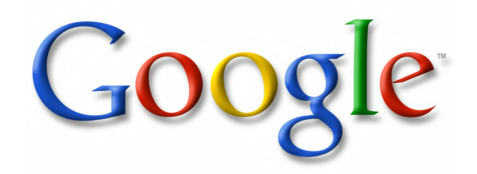



QC
665
B35


UC-NRLF
$B 24 209



Versuche zum Nachweis der magnetischen Kraft bei elektromagnetischen Wellen auf Drähten.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

UNIVERSITÄT MARBURG

VORGELEGT VON

KARL WILHELM BANGERT

AUS

FRANKFURT A. M.



MARBURG 1907.

Von der Philosophischen Fakultät als Dissertation
angenommen am 30. Oktober 1906.

Gedruckt mit Genehmigung der Fakultät.

Referent: Professor Dr. F. Richarz.

Druck von Bernhard Paul, Berlin SW. 48.

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit gewidmet.

Inhaltsübersicht.



Einleitung.

1. Das elektromagnetische Feld des Lecherschen Drahtsystems.

Die elektromagnetischen Schwingungen haben seit ihrer Entdeckung durch H. Hertz in ungeheurem Maße sowohl in praktischer als auch in theoretischer Beziehung Bedeutung erlangt. Für letztere sei auf die Bestätigung und den Ausbau der Maxwellschen Theorie hingewiesen; praktisch haben sie einen ungeahnten Aufschwung des Verkehrs in der Funkentelegraphie hervorgerufen. Das Thema der elektromagnetischen Schwingungen nimmt daher in der Experimentalphysik einen immer breiteren Raum ein, und es ist deshalb eine der Hauptaufgaben des Experimentes, die Schwingungen in ihren einzelnen Phasen, Komponenten und Wirkungen objektiv darzustellen.

Für diese Darstellung eignen sich die Wellen, die sich längs Drähten fortpflanzen, am besten. Denn wie schon Hertz[1]) nachgewiesen hat, dienen die Drähte nur zur Führung der Welle und geben durch ihren Verlauf nur die Richtung an, in der sich die Wellen ausbreiten. Was den Unterschied von Luftwellen und Drahtwellen angeht, so hat Abraham[2]) durch theoretische Untersuchungen dargetan, daß die Länge der Drahtwellen bei Schwingungsfrequenzen von $\frac{1}{T} = 3 \cdot 10^8$ von der Wellen-

---

[1]) H. Hertz, Gesammelte Werke II, 1894, p. 171.

[2]) M. Abraham, Ann. d. Phys. 6, p. 224, 1901.

länge im freien Äther nur um 0,04 % abweicht; messende Untersuchungen über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit haben Blondlot[1]), Trowbridge[2]) u. a. angestellt; sie fanden bei Lecherschen Drähten einen Durchschnittswert von $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec, also völlige Übereinstimmung mit der Lichtgeschwindigkeit.

Hertz hatte erst nur einen Draht zur Fortpflanzung genommen, doch sind die Verhältnisse dabei nicht exakt definiert, da bei Benützung nur eines Drahtes die in der Nähe befindlichen Leiter oder Dielektrika eine störende Rolle spielen und Wechsel der Kapazität des Einzeldrahtes hervorrufen. Erst die Einführung der Doppeldrähte durch Lecher gab Exaktheit in den Messungen, zugleich Intensitätssteigerung und vor allem klarere Verhältnisse. Diese sind die folgenden:

Bei dem Drahtpaare haben in gegenüberliegenden Punkten die Stromrichtung und die Spannung in jedem Zeitmoment einander entgegengesetzte Werte. Die hieraus resultierenden elektrischen und magnetischen Kraftlinien liegen in Ebenen, die auf beiden Drähten senkrecht stehen; die elektrische Kraft ist von Stellen des einen Drahtes zu gegenüberliegenden Stellen des andern Drahtes gerichtet, die magnetische Kraft ist senkrecht zu ihr. Diese Eigenschaft des Senkrechtstehens hat im ganzen Feld statt.

Was die Energieströmung (Strahlung) bei fortschreitenden Wellen auf dem Lecherschen Drahtpaar angeht, so erfolgt sie überall parallel zu den Drähten und immer in der Fortpflanzungsrichtung der elektrischen und magnetischen Kraft.

Ihren mathematischen Ausdruck finden diese Verhältnisse in dem Poyntingschen Theorem; dieses besagt folgendes: Hat man an einer Stelle die elektrische Kraft E und die magnetische Kraft M, dann fließt die Energie Σ

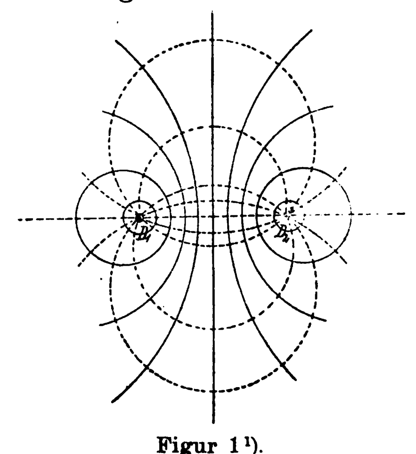
[1]) R. Blondlot, Compt. rend. 113, p. 628, 1891.
[2]) J. Trowbridge, Phil. Mag. 40, p. 211, 1895.

immer senkrecht zur Ebene, die durch die beiden Kräfte gebildet wird, und ist gegeben durch den Ausdruck

$$\Sigma = E \cdot M \cdot \sin\ (E, M).$$

In dem Falle des Lecherschen Systems wird nun der sin = 1, das elektromagnetische Feld schreitet parallel zu den Drähten fort und hat nur in nächster Nachbarschaft der Drähte eine bemerkbare Stärke.

Es ergibt sich also, wenn man sich einen Schnitt senkrecht zu der Drahtebene denkt, folgendes Bild der Komponentenverteilung:



Figur 1[1]).

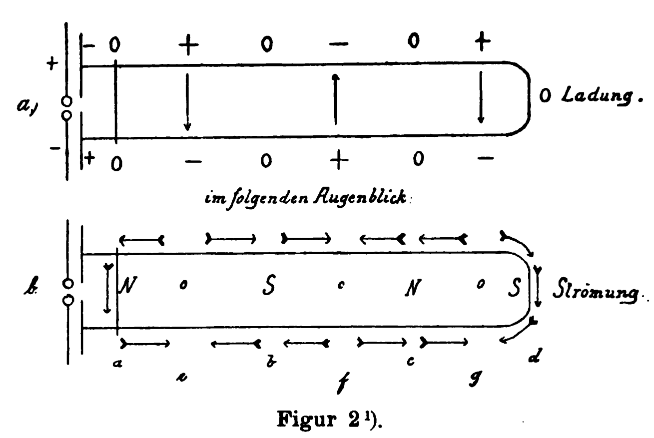
Der Querschnitt der Drähte ist mit D_1 bezw. D_2 bezeichnet. Die gestrichelten Kurven geben den Verlauf der elektrischen Kraftlinien an, die ausgezogenen Kurven den der magnetischen Kraftlinien. Die Richtung des Energieflusses steht senkrecht zur Ebene der Zeichnung.

Von wesentlicher Bedeutung sind und hauptsächlich zu Messungen verwendet werden die stehenden Wellen. Werden die Lecherschen Drähte am Ende zu einer Schleife leitend überbrückt, so bilden sich stehende Wellen aus; in der Mitte der Brücke ist naturgemäß ein Knotenpunkt der (elektrischen) Spannung, da von beiden Drähten

[1]) Aus J. v. Geitler, Elektromagnetische Schwingungen. Wissenschaft Bd. VI, p. 85, Braunschweig bei F. Vieweg, 1905.

her Wellen mit entgegengesetzter Ladung hier zusammentreffen.

Die Ladung ist an dieser Stelle also dauernd Null; das Gleiche findet statt, wenn man z. B. an der Stelle *a* eine Brücke über die Drähte legt. Dazwischen bilden sich stehende Wellen aus mit einer Ladungsverteilung, wie sie etwa für einen gewissen Augenblick die Figur 2a veranschaulicht. Die Pfeile geben dann die Richtung der elektrischen Spannung an, die zwischen den beiden Drähten in dem betrachteten Zeitmoment herrscht.



Figur 2[1]).

Die Ladungen auf den Drähten suchen sich jedoch im nächsten Augenblick auszugleichen über die Nullstellen der Ladungen hinweg. In der Figur 2b sollen die gefiederten Pfeile die Strömungsrichtung der positiven Elektrizität andeuten; man sieht, daß die Knotenstellen der Spannung Maximalstellen der Strömung sind. Diese Ströme kann man sich nun in ihrer Wirkung vorstellen als Kreisströme im Sinne der Ampèreschen Theorie, mithin als die Ursache magnetischer Erscheinungen. Danach hätte man an der Stelle *d* einen Stromumlauf in der Richtung des Uhrzeigers, also für die senkrecht zur Stromebene erzeugte magnetische Kraft einen Verlauf, der einen Südpol auf die Vorderseite

[1]) Nach F. Richarz, Neuere Fortschritte auf dem Gebiete der Elektrizität, 2. Auflage, p. 53, 1902, Leipzig bei B. G. Teubner.

der Zeichnung treiben würde. An der Stelle *c* hat man einen Umlauf im umgekehrten Sinne des Uhrzeigers, also die Nordrichtung der magnetischen Kraft zwischen den beiden Drähten, beidemale für den betrachteten Augenblick. An den Stellen *b* und *a* entsteht dann entsprechend dem vorigen wieder nach vorne gerichtet ein Südpol bezw. Nordpol der magnetischen Verschiebung im Äther. Dazwischen, an den Stellen *e*, *f*, *g*, wird die magnetische Kraft Null sein, da hier ein Umlauf der Strömungen nicht eintritt; das sind aber gerade die Stellen, an denen die elektrische Spannung zwischen den Drähten das Maximum ihrer Amplitude hat.

Die besprochenen Strömungen, durch die sich die Ladungen auf den Drähten ausgleichen und die eben zur Erklärung der magnetischen Kraft senkrecht zur Drahtebene verwendet wurden, sind ungeschlossene Ströme. Nach der Maxwellschen Theorie gibt es frei endende, ungeschlossene Ströme überhaupt nicht, sondern diese schließen sich stets kontinuierlich zu geschlossenen Strömen, indem die zum Kreisschluß noch fehlenden Stromstücke gebildet werden durch die Verschiebungsströme der Polarisation im umgebenden Äther. Im vorliegenden Falle beim Lecherschen System ist dieser Schluß der Strömungslinien im Äther leicht zu erkennen. In Figur 2a sind die elektrischen Kraftlinien eingezeichnet, die in einem gewissen Augenblick von einer Stelle maximaler Ladung auf einem Draht zu der gegenüberliegenden auf dem andern Drahte gehen, die also eine Polarisation im Äther vorstellen. Beim Verschwinden der Ladungen im folgenden Moment läßt diese Polarisation allmählich nach, es entstehen die dielektrischen Verschiebungsströme entgegen der Richtung der eingezeichneten Pfeile in Figur 2a. Man sieht direkt aus der Zeichnung, wie sich diese Verschiebungsströme mit den Strömungslinien in den Drähten, die in Figur 2b durch die gefiederten Pfeile bezeichnet sind, zu vollständig geschlossenen Kreisströmen zusammensetzen.

In dem auf den betrachteten folgenden Augenblick werden dann die elektrischen Ladungen wechseln, später auch die Strömungen; damit kehren sich auch die Richtungen der magnetischen Kraft um, sie wechseln im selben Tempo wie die elektrische Kraft wechselt.

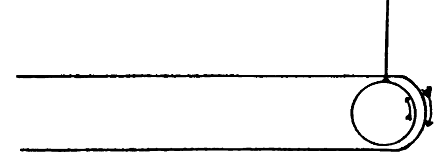
Magnetische und elektrische Kraft sind also in ihrer Stellung zueinander derart verschoben, daß die Amplitude der magnetischen Kraft an der Stelle ihren größten Wert hat, an der die der elektrischen Kraft ihren Nullpunkt besitzt.

2. Frühere Versuche zum Nachweis der magnetischen Kraft.

In seiner Arbeit[1]) betitelt „Die mechanischen Wirkungen elektrischer Drahtwellen" hatte Hertz Versuche angegeben, um die elektrische und magnetische Komponente gesondert am Lecherschen Drahtsystem nachzuweisen.

Er benutzte zur Sichtbarmachung der elektrischen Oscillationen die elektrostatische Wirkung auf ein Blattgoldstäbchen. Zur Demonstration der elektrischen Kraft wurden später noch mannigfaltige direktere Wege angegeben, womit jedoch meist als Endzweck quantitative Messungen verbunden waren, so die Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, der Dämpfung, der Brechung usw.

Die magnetischen Oscillationen wies Hertz nach am gemeinsamen Ende der Lecherschen Drähte, wo im Innern der vertikal gestellten Schleife eine starke oscillierende Äthermagnetisierung eintritt. Er verwandte dabei die elektrodynamische Wirkung auf einen Aluminiumring (Figur 3).



Figur 3.

[1]) H. Hertz, Ges. Werke II, 1894, p. 199.

Zur Erklärung der eintretenden Drehung des Ringes, die im Sinne einer Abstoßung der benachbarten Punkte des Ringes und der Drahtschleife erfolgt, sagt Hertz folgendes:

„Die schnell wechselnde magnetische Kraft muß in dem geschlossenen Reif einen im gleichen Rhythmus wechselnden Strom induzieren und auf diesen zurückwirkend den Reif ablenken. Die magnetische Kraft hat ihren größten Wert im Knoten der elektrischen Schwingung und ihre Richtung ist daselbst senkrecht auf der Ebene der Drahtschleife. Daß sie eine Abstoßung der benachbarten Teile des Reifes und der festen Drähte bewirken muß, erkennen wir am schnellsten, wenn wir sie als die Wirkung der in diesen Bahnen umlaufenden Ströme betrachten. Der in dem Reif induzierte Strom muß im Innern des Reifes beständig den Einfluß der induzierenden Strömung aufheben, also dieser in jedem Augenblick entgegengerichtet sein, demnach von ihr abgestoßen werden.“

Wie Herr Professor Richarz[1]) erwähnt, trifft zwar diese Darstellung, soweit sie das Wesen der Erscheinung angeht, im Sinne der Faraday-Maxwellschen Anschauungen zu. Vollständig ist diese Erklärung von Hertz jedoch nicht, wenn man die Ströme im Aluminiumring sich als durch Induktion erzeugt denkt. Die Selbstinduktion im Ringe spielt dabei eine wesentliche Rolle und ist daher wohl mitzuberücksichtigen.

Herr Professor Richarz weist darauf hin, daß hier eine Erklärung Platz zu greifen hat, wie sie auch für die Versuche elektrodynamischer Abstoßung von Elihu Thomson[2]) herangezogen werden muß. Wenn man durch die Windungen eines vertikalen Elektromagneten einen gleichförmigen Sinusstrom hindurchschickt, so ent-

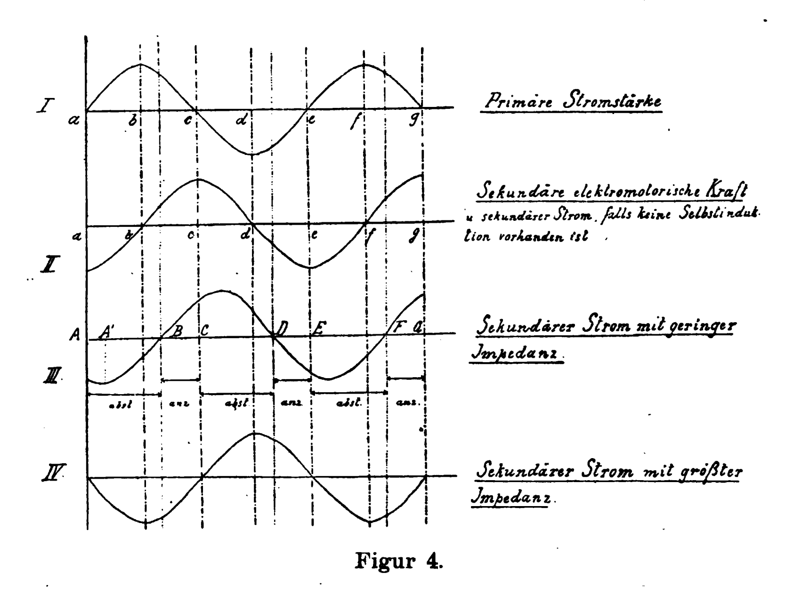
---

[1]) F. Richarz, Neuere Fortschritte, p. 55.

[2]) E. Thomson, Ztschr. für phys. u. chem. Unt. III, p. 38, 1889.

steht in dem Eisenkern ein sich periodisch änderndes Magnetfeld. Wird über den (verlängerten) Eisenkern ein Metallring gestreift, so werden in diesem Induktionsströme gleicher Schwingungszahl erzeugt, mit dem Resultate der elektrodynamischen Wirkung zwischen Primärstrom (bezw. dessen Eisenkern) und induziertem Ringstrom, daß der Ring kräftig abgestoßen wird.

Die Erklärung dieser Erscheinung ist folgende: Die in dem geschlossenen Leiterkreise induzierte elektromotorische Kraft ist um $\pi/2$ gegen den induzierenden primären Strom verspätet. In der Figur 4, in der auf der Abscisse die Zeit, auf der Ordinate die Stromstärke vom



Figur 4.

Nullwert aus nach oben und unten abgetragen ist, soll die Kurve I den Verlauf des primären Stroms darstellen und Kurve II die induzierte elektromotorische Kraft. Wenn die sekundäre Stromstärke dieselbe Phase hätte, wie die induzierte elektromotorische Kraft, dann würde nach je $\pi/2$ Anziehung bezw. Abstoßung erfolgen, je nachdem beide Stromsysteme gleiche Richtung haben oder in ent-

gegengesetztem Sinne verlaufen. Demnach fände auf der Strecke *a b* Abstoßung, auf *b c* Anziehung, auf *c d* wieder Abstoßung und auf *d e* wieder Anziehung u. s. f. statt. Es wäre also die Summe der Abstoßungen gleich der Summe der Anziehungen, und infolge des Beharrungsvermögens bliebe der Ring in Ruhe. Nun spielt aber hier bei den Wechselströmen im Ringe noch die Selbstinduktion eine wesentliche Rolle; die Selbstinduktion des sekundären Wechselstromes wirkt auf die Phase der Stromstärke gegenüber derjenigen der elektromotorischen Kraft verzögernd ein, und diese Verzögerung kann bis $\pi/2$ betragen. Nehmen wir an, die Phase des sekundären Stromes sei um einen gewissen Bruchteil von 2π, ausgedrückt durch die Strecke *A A'* bei Kurve III verschoben, so resultiert, gemäß dem Gesetze der Induktionswirkung zweier Ströme aufeinander, zwischen *A B* Abstoßung, zwischen *B C* Anziehung, zwischen *C D* und *E F* wieder Abstoßung und zwischen *D E* und *F G* Anziehung. Aus der Figur ist leicht ersichtlich, daß der Durchschnittswert der Abstoßung überwiegt. Ist vollends die Selbstinduktion so groß, daß die Maximalverzögerung von $\pi/2$ eintritt, so bekommt man, wie man aus dem Verlaufe der Kurve IV mit Vergleich mit dem der Kurve I sofort ersieht, nur noch Abstoßung.

Diese Erklärung ist in ganz analoger Weise auch auf das Verhalten des Hertzschen Aluminiumringes in der Lecherschen Schleife anzuwenden. Es kommt ebenfalls für den Ring noch seine Selbstinduktion in Betracht, die die sekundäre Strömung in ihm verzögert gegenüber dem Rhythmus der magnetischen Oscillationen. Und zwar ist hierbei noch folgendes zu beachten. Die Phasenverschiebung φ wächst mit der Frequenz des Wechselstroms und mit der Selbstinduktion, sie ist gegeben durch den Ausdruck [1])

---

[1]) F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, 10. Auflage, p. 519, 1905, Leipzig bei B. G. Teubner.

$$tg\,\varphi = \frac{\pi \cdot n \cdot L}{w}, \text{ wo}$$

w den Ohmschen Widerstand,
n die Wechselzahl und
L die Selbstinduktion

bedeutet. In dem vorliegenden Falle ist nun zwar die Selbstinduktion klein, da nur eine Windung vorhanden ist; da jedoch als wesentlicher Faktor die Wechselzahl mit auftritt, die bei Hertzschen Schwingungen sehr groß ist, so tritt doch eine Phasenverschiebung bis zu $\pi/2$ ein, mithin stärkste Abstoßung.

Mit dieser vervollständigten Überlegung kommt man also zu demselben Resultat, wie es Hertz gefunden hatte. Man kann hiernach nicht behaupten, daß die Hertzsche Versuchsanordnung und ihre Erklärung durch Einfachheit der eintretenden Wirkungen die Anschauung der ganzen, so einfachen Verhältnisse fördere, da neben der Induktion noch elektrodynamische Abstoßung eintritt. Wiederholt ist der Versuch, schon seiner komplizierten Anordnung wegen, wohl selten worden.

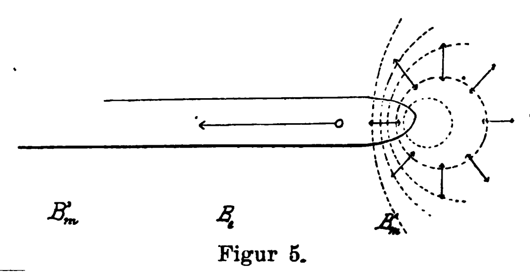
Hingegen ist an und für sich die Induktion durch Schwankungen des magnetischen Feldes, gemäß dem ersten Tripel der Maxwellschen Gleichungen, nicht ein indirekter Nachweis der magnetischen Oscillationen zu nennen. Diese Auffassung ist auch bereits allgemein in den Sprachgebrauch aufgenommen, z. B. in der Bezeichnung „induktive“ (d. i. magnetische) Koppelung, wie sie in der drahtlosen Telegraphie angewendet wird.

Die Induktion wurde daher im Laufe der Arbeit benutzt und direkt sichtbar gemacht.

Herr Professor Richarz hatte anläßlich seiner von ihm und W. Ziegler herrührenden Demonstration der oscillatorischen Entladungen vermittels der Braunschen Röhre die Ansicht vertreten, daß sich die magnetischen Oscillationen auf direkterem Wege und zwar am einfachsten und anschaulichsten mit der Braunschen Röhre zeigen lassen

müßten[1]). Auf seine Veranlassung stellte im Greifswalder Institut K. Kießling Versuche in dieser Richtung an, und er hatte auch insofern Erfolg, als sich die eintretende Ablenkung des Kathodenstrahls tatsächlich an gewissen Stellen als durch die magnetische Kraft des Lecherschen Systems hervorgerufen erwies. Naturgemäß ist die Wirkung der Drahtwellen auf den Kathodenstrahl erheblich schwächer, als wenn man Leydener Flaschen sich durch Spulen entladen läßt[2]), trotzdem war eine Wirkung in richtigem Sinne für die Richtung dermagnetischen Kraft und die Richtung der Ablenkung noch gut zu erkennen.

Die Ebene des Lecherschen Systems lag bei den Versuchen von K. Kießling unter dem Kathodenstrahlbündel, so daß die senkrecht zum Kathodenstrahl schwingende magnetische Kraft eine horizontale Ablenkung hervorrufen sollte. Diese horizontale Ablenkung trat am Ende der Lecherschen Schleife auch ein. Den kreisförmigen Schluß der magnetischen Kraftlinien am Ende der Schleife konnte er ebenfalls nachweisen, indem er diesem Verlaufe mit der Braunschen Röhre folgte; die Ablenkung des Kathodenstrahls zeigte an jeder Stelle die hier vorhandene Richtung der magnetischen Kraft an. In der Figur 5 sollen die



Figur 5.

[1]) F. Richarz und W. Ziegler, Phys. Ztschr. II, p. 433, 1901; vgl. auch eine Bemerkung in F. Richarz, Neuere Fortschritte, p. 57, und in den Berichten der Gesellschaft z. Beförd. d. ges. Natw., Marburg 1903, p. 96.

[2]) Vergl. H. Schuh, Demonstration der Abhängigkeit oscillatorischer Kondensatorentladungen vom Widerstand. Marburger Inaug.-Diss. 1905. Ztschr. f. phys. u. chem. Unterricht, XVII, p. 6, 1904; Nachtrag hierzu p. 126. Ann. d. Phys. 14, 1903, p. 204 u. p. 640.

Doppelpfeile die Schwingungsrichtung des Kathodenstrahls angeben, wie sie sich gemäß dem Verlaufe der magnetischen (gestrichelten) Kraftlinien ergab; der Kathodenstrahl ist dabei senkrecht zur Ebene der Zeichnung gerichtet gedacht. Als er aber die Braunsche Röhre parallel zur Drahtebene unter dieser entlang schob, unter Wahrung der dazu senkrechten Richtung des Kathodenstrahls, zur nächsten Maximalstelle der magnetischen Kraft (B_m^2), erhielt er an der dazwischen liegenden Maximalstelle der elektrischen Kraft (B_e) kein Minimum der Ablenkung, was jedenfalls auf unreine Wellen oder sonstige störende elektrostatische Einflüsse zurückzuführen ist.

Weitere Versuche in dieser Richtung wurden sodann im hiesigen Institut angestellt, sie sind in Kapitel IV beschrieben. Ebenfalls auf Veranlassung von Herrn Professor Richarz von Herrn K. Kießling untersucht, aber später anderweitig benutzt[1]), wurde die Magnetisierung von Eisenpulver für die Zwecke einer Demonstration der magnetischen Kraft. Fortgeführt wurden die Versuche im hiesigen Institut von Herrn A. Stützer[2]). Diese führten jedoch nur zu bedingten Resultaten, worauf in einem besonderen Abschnitt (Kapitel V, 2) näher eingegangen werden soll, wie auch auf die Versuche, die inzwischen über die Magnetisierung von Eisenpulver bei schnellen Schwingungen von F. Braun[3]) und J. Zenneck[4]) veröffentlicht wurden.

Die Versuche, die magnetischen Oscillationen auf direktem Wege anschaulich zu machen, wurden im Sommer 1904 im hiesigen Institute wieder aufgenommen und unter dem Gesichtspunkte durchgeführt, daß die Demonstration sich zu einem bequemen Vorlesungsversuche

---

[1]) K. Kießling, Greifswalder Inaug.-Diss. 1902, p. 40.

[2]) Erwähnt, ebenso wie die beschriebenen Versuche von K. Kießling, in den Sitzungsberichten der Gesellschaft zur Beförd. d. ges. Natwiss., Marburg 1903, p. 97.

[3]) F. Braun, Ann. d. Phys. 10, p. 326, 1903.

[4]) J. Zenneck, Ann. d. Phys. 12, p. 869, 1903.

eigne. Die Versuche waren im Prinzipe bereits fertiggestellt, als J. Zenneck in seinem Buche „Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie“ [1]) speziell für den Nachweis der magnetischen Kraft Versuche angab. Die im hiesigen Institute angestellten Versuche weichen jedoch in ihrer Anordnung von den von Zenneck gegebenen ab; so wurde einmal eine viel kleinere Wellenlänge benutzt, so daß der ganzen Demonstration eine größere Handlichkeit und eine bessere Übersicht gegeben werden konnte; dann auch wurden in Bezug auf die Wirkung der magnetischen Kraft methodisch abweichende Wege eingeschlagen. Auf Einzelheiten wird an den betreffenden Stellen hingewiesen werden.

Auf zwei verschiedenen Wegen wurde an die Aufgabe herangetreten, und zwar wurde einmal die Anordnung geradliniger Wellenfortpflanzung benutzt und ferner die Fortpflanzung auf Spulen.

---

[1]) J. Zenneck, Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie, Stuttgart bei F. Enke, 1905.

I. Kapitel.

Versuche am Lecherschen System.

1. Der Erreger und das Drahtsystem.

Als Erreger und als geradliniges Drahtsystem wurde die von Coolidge modifizierte Anordnung[1]) mittels Blondlotschen Erregers gewählt. Der Blondlotsche Erreger hatte eine Form, wie sie von der Firma Leybold in Köln geliefert wird; sowohl Primärkreis wie Sekundärkreis hatten einen Durchmesser von 6,5 cm; beide Kreise waren zur Verhütung des Funkenübergangs durch widerstandsfähige Glimmerplatten getrennt. Die Zuführung zu der einen Kugel des Primärkreises war unterbrochen, sie lief in eine Spitze aus, die der Kugel gegenüberstand; der Abstand zwischen beiden konnte beliebig, auch während des Versuches, variiert werden. Auf diesen Umstand, der für die gute Ausbildung der Wellen sehr wichtig ist, hat schon Drude[2]) hingewiesen. Die beiden Kreise lagen in einem Petroleumbade, das Petroleum mußte aber häufig erneuert werden, da infolge der sich ausscheidenden Kohlenpartikelchen Kurzschluß im Oscillator auftrat. Über das Arbeiten des Erregers in frischem und in gebrauchtem Petroleum hat Nesper[3]) Versuche gemacht;

---

[1]) W. C. Coolidge, Wied. Ann. 67, p. 578, 1899.

[2]) P. Drude, Ztschr. f. phys. Chemie 23, p. 271, 1893, cf. auch F. Kiebitz, Ann. d. Phys. 5, p. 874, 1901.

[3]) E. Nesper, Rostocker Inaug.-Diss. 1904, p. 16.

ebenfalls nach seinen Angaben ist Sorge dafür zu tragen, den Oscillator in frischem Petroleum liegen zu haben, da die Aktivität des Erregers sonst bedeutend sinkt, was er an Kurvenbildern veranschaulicht. Nesper benutzte daher zu seinen Untersuchungen einen „Tropföloscillator", bei dem durch reguliertes Zufließen von frischem Petroleum und Abfließen von gebrauchtem der Funkenübergang immer in frischem Petroleum stattfinden konnte. Gespeist wurde der Erreger durch einen Teslatransformator, da dann die Erregerschwingungen eine größere Intensität besitzen, als wenn sie durch ein Induktorium allein erregt würden. Außerdem hat diese Art der Speisung den Vorteil, daß man wegen der Unschädlichkeit der Teslaströme die Funkenstrecke des Blondlotschen Erregers während des Versuches durch direktes Anfassen verstellen kann[1]).

Was die Darstellung der Wellen selbst angeht, so erzielt man mit dem Erreger durchschnittlich eine Wellenlänge von 80 cm. Coolidge verwandte sogar Wellen von viel kleinerer Länge. Je längere Wellen man nun verwendet, um so intensiver wirken sie und desto reiner werden sie; da dies hier namentlich für die magnetische Komponente von Vorteil war, wurde eine größere Wellenlänge als die obige dadurch erreicht, daß an den sich gegenüberstehenden Drahtenden des Primärkreises Kondensatorplatten (in der Figur 6 mit c bezeichnet) angebracht wurden mit einem Durchmesser von 3 cm und in einem Abstande von 0,8 cm, eine Forderung, die ebenfalls Drude ausgesprochen hat[2]), während er zur Herstellung sehr kurzer Wellen die Vermeidung eines Kondensators für notwendig erklärt. Die hieraus resultierende Wellenlänge betrug 110 cm. Ein Hauptvorteil war der, daß den Knotenstellen der elektrischen Kraft, und damit den dunkeln Stellen des Systems, eine größere Länge zukam, und die

---

[1]) F. Kiebitz, a. a. O. p. 874.
[2]) P. Drude, Wied. Ann. 55, p. 633, 1895.

magnetische Kraft daher in größerer Ausdehnung benutzt werden konnte.

Zur Fortleitung der Wellen wurde 0,1 mm dicker Kupferdraht benutzt, und für den folgenden Aufbau die Drahtebene vertikal gelegt.

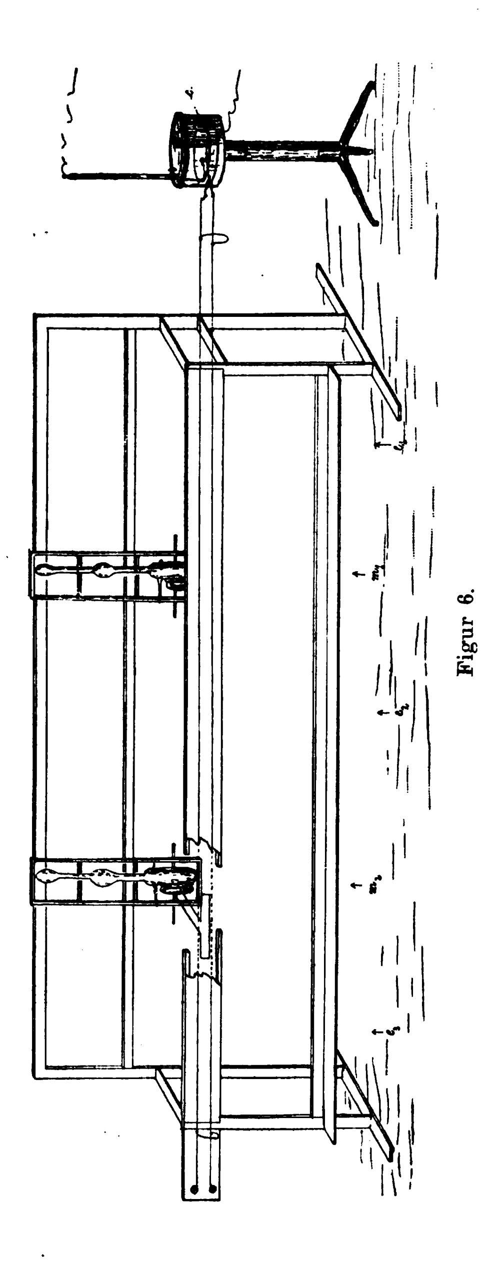
Das an den Maximalstellen der elektrischen Kraft eintretende Leuchten der Drähte ist wie K. Schaum und F. A. Schulze[1]) nachwiesen, wahrscheinlich durch Jonisation der Luft durch Spitzenentladung zu erklären, was sich daran zeigt, daß ein geladenes Elektrometer in der Nähe eines Bauchs der elektrischen Kraft schnell entladen wird, sowohl bei positiver wie bei negativer Ladung, bei ersterer sogar bedeutend schneller. Auch tritt nur bei den Strahlungsstellen, also in den Maximalstellen der elektrischen Kraft, Kondensation des Dampfstrahles ein. Beide Erscheinungen bleiben aus an den Knoten der elektrischen Kraft; auch findet das Leuchten nicht mehr statt, wenn man die dünnen Drähte durch dickere ersetzt.

Das Leuchten der Drähte kann man nach K. Schaum und F. A. Schulze sehr verstärken, so daß sofort nach Einsetzen der Wellen die Erscheinung für ein großes Auditorium ohne Dunkeladaption sichtbar ist, indem man fluoreszierende Substanzen zur Verstärkung heranzieht; als solche empfehlen sie Chininsulfat, Baryumplatincyanür und Uranglas. Zu den Versuchen wurden Streifen von Baryumplatincyanür benutzt, auf dem das Leuchten der Drähte ein breites fluoreszierendes Band hervorrief.

Um mit der Demonstration möglichste Übersichtlichkeit und Handlichkeit zu verbinden, wurde nun zu der Konstruktion eines festen Rahmens geschritten, der in seinem definitiven Aufbau eine Form bekam, wie sie in Figur 6 abgebildet ist.

Der ganze Rahmen, aus Buchenholzleisten hergestellt, hatte eine Länge von 150 cm. Auf zwei schmalen Leisten der Vorderseite waren ca. 5 cm breite Streifen von Baryum-

[1]) K. Schaum und F. A. Schulze, Ann. d. Phys. 13, p. 422, 1904.



Figur 6.

platincyanür aufgeklebt in der ganzen Länge des Rahmens. Auf diesen war das Drahtsystem aufgespannt und wurde zum Zwecke des besseren Fluoreszierens mit kleinen Wachskügelchen fest an das Baryumplatincyanür gepreßt. Infolge der erzielten Wellenlänge des Blondlotschen Erregers konnten so 3 Maximalstellen der elektrischen Kraft durch kräftiges Fluoreszieren sichtbar gemacht werden. Nicht allzu kurz hinter dem Erreger war die erste Brücke angebracht, eine zweite Brücke befand sich im vierten Knoten der elektrischen Kraft am Ende des Rahmens. Trotzdem wegen der Anordnung der Sekundärkreise im zweiten und dritten Knoten keine Brücken aufgelegt werden konnten, so waren die beiden Knotenstellen doch scharf ausgebildet, eben infolge der größeren intensiveren Wellenlänge. Bei kleinerer Wellenlänge stand man immer vor der Entscheidung, entweder zur guten Ausbildung der Knoten überall an den Knotenstellen Brücken anzubringen, wodurch aber dann die ganze Leuchterscheinung viel schwächer wurde, oder die Brücken wegzulassen, auf deutliche Knotenstellen zu verzichten und stärkeres Leuchten zu erhalten. Die größere Wellenlänge beseitigte diese Mißstände vollständig[1]).

2. Der Sekundärkreis.

Die magnetische Kraft wurde nun nachgewiesen in analoger Weise, wie sie Blondlot[2]) benutzte, um die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Drahtwellen zu messen, nämlich mittels eines abstimmbaren Sekundärkreises, eine

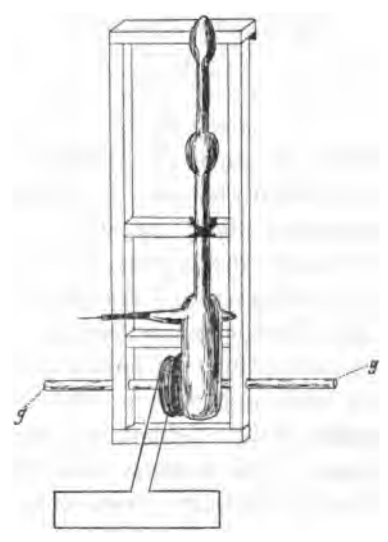
---

[1]) Wurde der Erreger längere Zeit beansprucht, so traten zeitweise Oberschwingungen auf, wohl infolge einer geringen Änderung der Funkenstrecke durch verschmutzendes Petroleum; doch schadete das der Demonstration mit dem Sekundärkreis nichts, da dieser nur auf die Grundschwingung abgestimmt war, wohl aber dem Ineinandergreifen mit den elektrisch leuchtenden Stellen.

[2]) R. Blondlot, Compt. rend. 113, p. 628, 1891.

Methode, die auch späterhin vielfach zu Messungen benutzt wurde [1]).

Ein 8 cm langes, 1,8 cm breites Drahtviereck, dessen Ebene vertikal hinter den Lecherschen Drähten lag, war mit einem verstellbaren Kondensator verbunden; die Verstellung



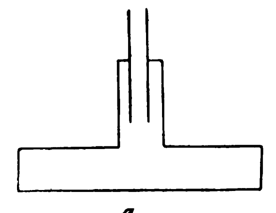
Figur 7.

wurde mittels der an der Seite des Rahmens (Figur 7) sichtbaren Glasstiele (g) bewerkstelligt. Das Ganze war an einem Rahmen befestigt, der sich hinter dem Baryumplatincyanür in einer Führung (auf der obersten Leiste des großen Rahmens) verschieben ließ. An die eine Kondensatorplatte war eine Warburg-Zehnder-Röhre [2]) angelegt, die ebenfalls mit dem Rahmen verschiebbar war. Bei den Vorversuchen, die dazu dienten, durch passende Wahl der Kondensatoren eine gute Sekundärschwingung zu erzielen, wurde an die Kondensatorplatten statt der Röhre eine kleine Funkenstrecke angebracht, auf die aber dann verzichtet wurde. Schematisch ist der Sekundär-

[1]) So zur Messung des Brechungsexponenten durch P. Drude, Wied. Ann. 55, p. 633, 1895.

[2]) L. Zehnder, Ann. d. Phys. 9, p. 917, 1902.

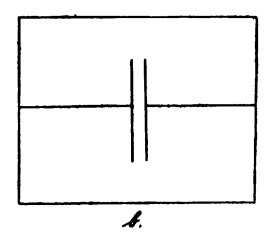
kreis in Figur 8a dargestellt. Wichtig war es, den



Figur 8a.

Sekundärkreis nicht zu stark zu koppeln[1]), die Funkenstrecke war nur dann scharf ausgeprägt, wenn die magnetische Koppelung nicht zu stark war; das Drahtviereck lag daher mit seiner Ebene immer ungefähr 5 mm hinter der Baryumplatincyanür-Papierebene.

Im Laufe des Versuches wurde der Sekundärkreis etwas abgeändert; es stellte sich nämlich heraus, daß eine scharfe Resonanz sich mit diesem offenen Schwingungskreis nicht erreichen ließ; offenbar war die Kapazität des Kondensators zu groß. Es wurden daher die Kondensatorplatten mit einem Drahtbügel verbunden, so daß die Kondensatorplatten nunmehr parallel geschaltet waren; in diesem, in Figur 8b schematisch gezeichneten, geschlossenen



Figur 8b.

Kreise tragen dann die Kondensatorplatten nicht mehr so zur Kapazitätsvermehrung bei wie im ersten Falle.

Zwei solcher Sekundärrahmen wurden nun an den beiden Knotenstellen der elektrischen Kraft angebracht, wo die magnetische Kraft also ihre Maximalstelle hat; infolge der

---

[1]) P. Drude hat dies theoretisch näher begründet, Ann. d. Phys. 13, p. 622, 1904.

im Sekundärkreise erregten Schwingungen, die sich durch genaues Einstellen der Kondensatorplatten auf beste Resonanz einstellen ließen, kamen die Warburg-Zehnder-Röhren in kräftiges Leuchten.

3. Gesamtdemonstration.

Es bot sich also folgendes Bild dar: Die vom Blondlotschen Erreger ausgehenden elektromagnetischen Schwingungen ließen die elektrische Komponente erkennen durch kräftiges Leuchten des Baryumplatincyanürs infolge der Spitzenausstrahlung der Drähte, was an drei Stellen sichtbar war. An den dazwischen liegenden dunkeln Stellen zeigte die magnetische Kraft ihre Wirkung auf die Sekundärkreise durch Aufleuchten der Zehnder-Röhren. Durch Verschieben der Sekundärrahmen auf die kurze Strecke von $\lambda/4$ hörte das Leuchten der Zehnder-Röhren auf.

Obwohl die ganze Erscheinung im verdunkelten Zimmer auch nicht adaptierten Augen sofort sichtbar war, wurden doch für die erste Zeit an den Schwingungsbäuchen der elektrischen Komponente Zehnder-Röhren über die Primärdrähte gelegt u. z. nach unten zu, an den Stellen e_1, e_2, e_3 (s. Figur 6), während die Röhren der Sekundärkreise über dem Baryumplatincyanür standen, in m_1 und m_2. Man hatte dann sofort die Erscheinung dreier leuchtender Röhren (nach unten leuchtend), von der elektrischen Kraft herrührend, und dazwischen (nach oben) zwei leuchtende Röhren, von der induzierenden magnetischen Kraft herrührend. Auch die Zehnder-Röhren auf dem Primärkreis waren auf der unteren Leiste des Rahmens verschiebbar eingerichtet, um zu zeigen, daß sie an den Knotenstellen der elektrischen Kraft, also in m_1 und m_2, nicht ansprechen. Durch leichte Neigung nach vorne konnten dann die „primären" Röhren von der Drahtebene abgehoben werden, um einerseits das leuchtende Band der Primärleitung, andererseits auch das Leuchten der „sekundären" Röhren besser hervortreten zu lassen, das naturgemäß schwächer war als das Leuchten der „primären"

Röhren. Es stellte sich dabei heraus, daß die Warburg-Zehnder-Röhren auf die Wellen besser ansprachen als Heliumröhren älterer Konstruktion [1]).

Die ganze Anordnung hat den Vorteil der getrennten Demonstration beider Komponenten, und zwar gleichzeitig an mehreren Stellen, so daß das unbequeme Auswechseln verschiedenartiger Sekundärapparate sowie das Verschieben dieser auf längere Strecken fortfällt.

Eine hiervon prinzipiell nicht verschiedene Anordnung wurde neuerdings von Zenneck gegeben in seinem oben erwähnten Buche [2]). Er benutzt größere Wellen, zur Demonstration der elektrischen Bäuche hängt er Geißlersche Röhren an die Drähte; zur Demonstration der magnetischen Kraft führt er eine abgestimmte Spule mit Geißlerscher Röhre zwischen den Drähten entlang; die Röhre zeigt dann durch ihr Aufleuchten die Stellen maximaler magnetischer Kraft, die in der Sekundärspule eine Schwingung hervorruft.

Übrigens wurde verschiedentlich zu den Versuchen auch Lamettaband (0,1 mm dick und 0,5 mm breit) benutzt an Stelle der Lecherschen Drähte. Die Leuchterscheinung trat dann ebenfalls sehr gut ein, wobei allerdings die Wellenlänge etwas kleiner war. Namentlich auf dem Baryumplatincyanür wurden dadurch zwei sehr stark fluoreszierende Streifen von ziemlicher Breite hervorgerufen.

---

[1]) E. Dorn, Ann. d. Phys. 16, p. 784, 1905. Dieselbe Bemerkung machte auch Gehrke, E. T. Z. 1905, p. 698. Auch Herr A. Eymer (Marburger Inaug.-Diss. 1906, p. 9) im hiesigen Institut fand gelegentlich von Messungen von Dielektrizitätskonstanten mittels des bekannten Drudeschen Apparates, daß von ihm benutzte Heliumröhren nicht den Grad der Empfindlichkeit besaßen, wie die Zehnder-Röhren. Erstere mußten erst an intensiveren Schwingungskreisen, wie Teslatransformator, „angesteckt" werden, um dann auch auf schwächere Wellensysteme anzusprechen. Neuerdings hat nun Dorn Heliumröhren konstruiert mit elektrolytisch eingeführtem *K* und *Na*, die bedeutend empfindlicher sind, cf. Ann. d. Phys. 20, p. 127, 1906.

[2]) J. Zenneck, Elmgt. Schwgn., p. 731.

II. Kapitel.

Versuche mit der Seibtschen Spirale.

1. Allgemeine Verhältnisse bei Spulen.

So anschaulich die Verhältnisse auf geradlinig ausgespannten Drähten sich auch gestalten, zumal sie die Verteilung des Feldes in einfachster Weise erkennen lassen, so zeigt sich dabei doch der Nachteil, daß sich Influenzwirkung auf benachbarte Metallteile und Oberschwingungen störend geltend machen. Die Erscheinungen sind auch keine sehr kräftigen, vorausgesetzt, daß man nicht lange Drahtleitungen nimmt, die aber wieder für Demonstrationszwecke zu unbequem sind. Auch in der Funkentelegraphie trat dieser Übelstand zutage, und man ging daher, wenigstens bei der Empfangsstation, teilweise zur Spulenform über, da diese Anordnung die bequemste ist, um große Drahtmengen unterzubringen. Erst dadurch wurde große Sicherheit der Zeichenübertragung erreicht. Hierauf beruht auch der Slabysche Multiplikationsstab[1]) zur Messung der Wellenlänge in der Funkentelegraphie. Seine Anwendung fand er in der Abstimmspule bei der Empfangsstation in der Funkentelegraphie, um den Kohärer in den maximalen Wirkungsbereich der Spannung zu bringen. Durch Anschluß einer solchen Spule kann die Endspannung der Antenne auf das mehrfache gesteigert, „multipliziert", werden.

Diesen Multiplikationsstab hat G. Seibt theoretisch untersucht[2]) und dann auch ausgezeichnete Versuche mit

---

[1]) A. Slaby, E. T. Z. 1903, p. 1007.

[2]) G. Seibt, E. T. Z. 1901, p. 580.

der nach ihm benannten Seibtschen Spirale angegeben [1]).

Die Erzeugung prägnanter stehender Wellen ist ein Vorzug der Drähte in Spulenform, wie auch Seibt theoretisch dargetan hat. Aus den Gleichungen, die er aufgestellt hat, ergibt sich für die Spannungserhöhung die Forderung nach großer Selbstinduktion, kleiner Kapazität und kleinem Widerstand bei hoher Wechselzahl; die beiden ersten Forderungen sind im Vergleich mit einem geradlinig ausgespannten Drahte erfüllt.

Die Seibtsche Spirale wird daher jetzt wohl allgemein zur Demonstration stehender elektrischer Wellen auf Drähten verwendet, aber auch nur um die Wirkung der elektrischen Komponente darzutun.

Was die Feldverhältnisse angeht, so sagt Seibt darüber folgendes:

„Nach Poynting wandert die Energie immer in einer Richtung durch das elektromagnetische Feld, welche sowohl zur Richtung der elektrischen wie der magnetischen Kraft senkrecht steht. Bei Spulen ist nun, abgesehen von sehr kurzen Wellen .... die magnetische Kraft im Innern der Windungen am kräftigsten und verläuft in großer Ausdehnung nahezu parallel mit der Achsenrichtung der Spule. Dort, wo die kräftigste Ätherstörung ist, wandert daher die Energie stets wieder in die Windungen zurück. Die Innenfläche der Spule verhält sich also analog der leuchtenden Wandung eines Hohlzylinders, sie hält die Energie zusammen.“

2. Experimentelle Bestimmung der magnetischen Kraft bei Spulen.

a. Die magnetische Kraft im Innern der Spule.

Zenneck [2]) verwandte zur Demonstration der magnetischen Kraft induktiv gekoppelte Spulen. In dem hohlen

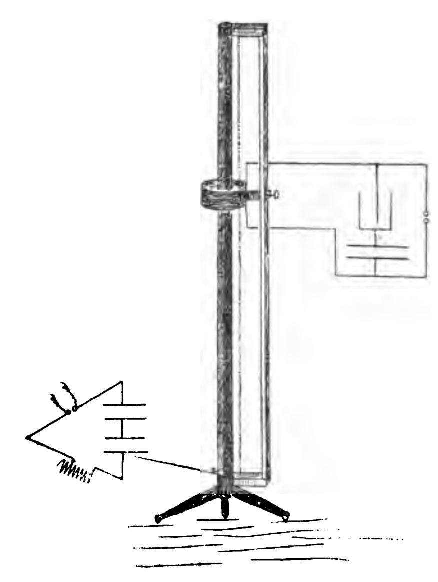
---

[1]) G. Seibt, Rostocker Inaug.-Diss. 1902.

[2]) J. Zenneck, Elmgt. Schwgn., p. 736.

Innern einer solchen Spule führte er einen abgestimmten Sekundärkreis entlang, der mit einer Geißlerschen Röhre verbunden war; letztere leuchtete und erlosch, wenn sich die Induktionsspule an den Bäuchen bezw. Knoten der magnetischen Kraft befand; die elektrische Kraft war durch eine neben der Spule befindliche Serie von Geißlerschen Röhren sichtbar gemacht.

Bei den vorliegenden Versuchen wurde die Seibtsche Spirale direkt verwendet. Als Erreger diente der von Seibt modifizierte Thomsonsche Schwingungskreis. Ein Induktorium, das eine Schlagweite von 25 cm hat, speist zwei Leydener Flaschen, die sich ihrerseits durch eine variable Selbstinduktion und eine Funkenstrecke hindurch entladen (vergl. Figur 9; der Schwingungskreis ist links schematisch angedeutet); die hierbei erzeugten Schwingungen sind wenig gedämpft und die Grundschwingung ist so kräftig, daß die Oberschwingungen keinen störenden Einfluß ausüben. Die Zuführung zur Spirale geschah von dem einen Belag der einen Leydener Flasche aus zu



Figur 9.

dem unteren Ende der Spirale; das obere Ende war zur Erde abgeleitet, der Paralleldraht war lose daneben gespannt, an dem abgeleiteten Ende bildete sich also von selbst ein Knoten der elektrischen Kraft aus. Nachdem durch passende Wahl der Selbstinduktion auf eine gewisse Schwingung abgestimmt war, so daß man z. B. zwei Bäuche und in der Mitte einen Knoten der elektrischen Kraft sah, wurde der Paralleldraht entfernt[1]) und eine Sekundärspule über die Spirale gestülpt, die vertikal an ihr verschoben wurde (vergl. Figur 9). Verwendet wurde eine kernlos gewickelte Spule aus 1 mm dickem Kupferdraht mit 20 Windungen und einem Durchmesser von 11,5 cm. Die ganze Spule war gut paraffiniert, um ein Überspringen von Funken von Spirale zu Spule zu vermeiden. Eine Funkenstrecke mit verstellbarem Kondensator und einer Zusatzkapazität in Gestalt einer Leydener Flasche machten den Sekundärkreis vollständig; die Funkenstrecke war zu den Kapazitäten parallel geschaltet (in Figur 9 rechts schematisch angedeutet). Der Kondensator bestand aus zwei Messingplatten von 15 cm Durchmesser mit Mikrometerverschiebung. Bei einer für die Resonanz günstigsten Kapazitätswahl trat an den Knoten der elektrischen Kraft lebhaftes Funkenspiel des Sekundärkreises auf. Die in Richtung der Spiralenachse und damit auch in Richtung der Spulenachse schwingende magnetische Kraft induziert in der Spule eine elektromotorische Kraft, die sich durch Strömung im gesamten Sekundärkreise kund tut. Im Bauche der elektrischen Kraft zeigte der Sekundärkreis keine Schwingung. Verschiebt man die Sekundärspule nach oben oder unten zum Bauch der elektrischen Kraft hin, so erlischt das Funkenspiel, um wieder einzutreten, wenn man die Spule zum nächsten Knoten der elektrischen Kraft verschiebt. Am anschaulichsten wird der Versuch, wenn man an der

[1]) Die Wellenlänge ändert sich dann etwas, doch ist die Verrückung des Knotens im Verhältnis zu seiner Ausdehnung unbedeutend.

Seibtschen Spirale die Wellenlänge so verkürzt, daß mehrere, 2 oder 3 Knoten auf die Spirale zu liegen kommen, und die Sekundärspule nach unten verschiebt, man hat dann das wechselnde Funkenspiel öfter.

Die elektrische Komponente ließe sich gleichzeitig, ähnlich wie bei Zenneck, durch nebenbefindliche Geißlersche Röhren zeigen[1]), auch ist es vorteilhaft zwei oder mehrere Sekundärkreise anzubringen; die Resonanz der letzteren ist dann durch eine an den Kondensator angelegte Geißlerröhre deutlicher zu zeigen.

b. Die magnetische Kraft im Äußern der Spule.

Von Interesse war es auch, den Verlauf der magnetischen Kraftlinien im äußeren Felde der Spirale nachzuweisen. Es wurde mit demselben Sekundärkreise operiert und das Feld systematisch abgesucht; die Richtung der magnetischen Kraft an einer Stelle wurde so ermittelt, daß man dort die Resonanzspule anbrachte und diejenige Lage der Windungsebene aufsuchte, bei der sich eine maximale Funkenlänge im Sekundärkreise ergab.

Auch im Äußern des Spiralenfeldes verläuft an den Stellen der elektrischen Knoten die magnetische Kraft parallel zur Spiralenachse; an den Bäuchen der elektrischen Kraft kehrt sie in die Windungen zurück. Es ergab sich danach ein Kraftlinienverlauf, wie ihn die Figur 10a veranschaulicht. Das ausgezogene Viereck stellt die Sekundärspule dar (Schnitt parallel zur Spulenachse), in den verschiedenen Stellungen, an denen die Funkenstrecke des Sekundärschwingungskreises ansprach, wo also magnetische Kraftlinien die Spule durchsetzten; in den gestrichelten

---

[1]) Es gelang leider nicht, nach Entfernung des Paralleldrahtes die elektrische Kraft anders auf größere Entfernung zu zeigen; für kleine Spulen, die im Zustande der Resonanz in $^1/_4$-Welle schwingen, sowie für den Slabyschen Multiplikationsstab, läßt sich nach Angabe von Slaby (a. a. O.) das Sprühen sehr schön durch Fluoreszieren des Baryumplatincyanürs zeigen. Slaby hat damit bis auf 0,4 % genau die Abstimmung angeben können.

Stellungen ergab sich keine Sekundärschwingung. Die Verteilung der Kraftlinien war natürlich symmetrisch zur Achse um die ganze Spirale herum, und es konnten mit der angefertigten Spule bis auf einen Abstand von 20 cm von der Spirale weg noch Kraftlinien nachgewiesen werden[1]).

3. Diskussion der Komponentenverteilung.

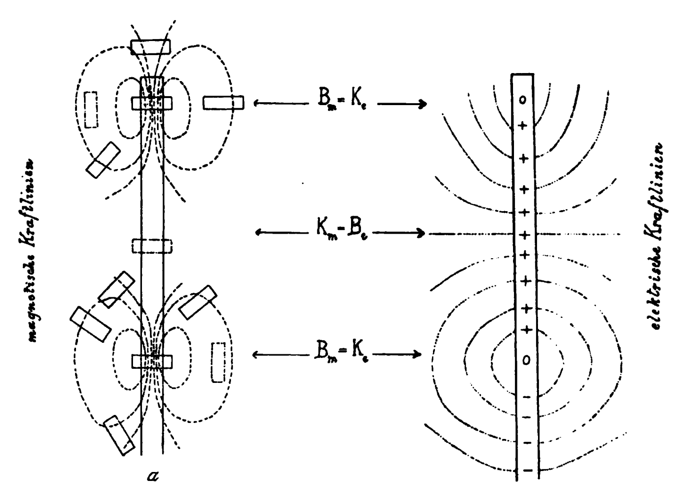
Wie Nesper theoretisch und experimentell dargetan hat[2]), ist die elektromagnetische Strahlung einer Spule sehr gering, weit geringer als bei einem ausgespannten Einzeldrahte. Nach dem Poyntingschen Satze vom Energiestrom (vgl. Seite 8) ist diese Strahlung gleich dem Vektorprodukt aus elektrischer und magnetischer Kraft, multipliziert mit dem Sinus des Winkels, den elektrische und magnetische Kraft miteinander bilden. Der Verlauf der magnetischen Kraftlinien wurde im vorigen Abschnitt nachgewiesen. Es bliebe nun nur noch der Verlauf der elektrischen Kraftlinien anzugeben. Hertz hat für den ausgespannten Einzeldraht den Verlauf der Kraftlinien diskutiert[3]) für verschiedene Frequenzen. Die Linien gehen vom Drahte aus und kehren auch wieder zu ihm zurück. Für die Spule dürften die Verhältnisse kaum anders liegen. Danach würden in einem gewissen Zeitmoment die Kraftlinien an Stellen positiver Ladungen von der Spule ausgehen und an Stellen der negativen Ladungen wieder zur Spule zurückkehren (vgl. Figur 10). Magnetische und elektrische Kraftlinien werden also in großer Ausdehnung nahezu parallel verlaufen, nur da wo sie in die Spirale einbiegen, werden sie sich unter einem gewissen Winkel

---

[1]) Jedenfalls läßt sich der Bereich der Kraftlinien noch weiter verfolgen, nur müßte man dann die Windungszahl der Spule erhöhen mit wachsender Entfernung von der Spirale, da immer weniger Kraftlinien die Sekundärspule durchsetzen werden.

[2]) E. Nesper, Strahlung von Spulen, Rostocker Inaugural-Dissertation 1904.

[3]) H. Hertz, Gesammelte Werke II, 1894, p. 167.



Figur 10.

schneiden. Dies würde auch mit den Resultaten von Nesper übereinstimmen. Der angegebene Verlauf der Kraftlinien ruft keine Strahlung hervor, es wird keine Energie in den Raum hinausgelassen; denn da elektrische und magnetische Kraft in Meridianebenen liegen, so erfolgt danach die Energieströmung in Kreisen um die Spulenachse herum; auch Gehrke[1]) spricht sich anläßlich der Eichung der Slabyschen Multiplikationsstäbe für diese Erklärung aus.

Bemerkt sei übrigens noch, daß der ganze Raum in starke elektromagnetische Erschütterungen versetzt wurde, die sehr störend wirkten; die Resultate wurden dadurch beeinflußt, so mußte z. B. dafür Sorge getragen werden, daß die Verbindungsdrähte von Sekundärspule zum Kondensator und zur Funkenstrecke nicht vertikal herunterhingen, die Funkenstrecke spielte dann immer.

[1]) Gehrke, E. T. Z. 1905, p. 697.

III. Kapitel.

Versuche mit zwei Spiralen als Lechersches System.

1. Versuchsanordnungen.

Die Seibtsche Spirale ist das Analogon des ausgespannten Einzeldrahtes, wie ihn Hertz bei seinen ersten Versuchen benutzte, hier nur zur Spirale aufgewickelt. Die Nachteile des Einzeldrahtes wurden oben, Seite 8, auseinandergesetzt. Diese Nachteile kommen bei der Spule nicht so zur Geltung wegen der prägnanteren Ausbildung stehender Wellen und wegen der geringeren Strahlung; doch bleibt noch der Nachteil der Beeinflussung von zufälligen äußeren Kapazitäten u.s.w. wie beim Einzeldraht.

Das vollständige Analogon des Lecherschen Systems würden nun zwei nebeneinander liegende Spiralen mit parallelen Achsen sein, angeschlossen an einen Hertzschen Erreger, eine Anordnung von der auch Zenneck[1]) erwähnt, daß sie von F. Braun benutzt worden sei, um intensive stehende Wellen zu erhalten. Auch an die Untersuchung eines solchen Systems wurde herangetreten. Der Gedankengang war dabei folgender:

Analog wie beim Lecherschen System sollten sich entgegengesetzte Ladungen gegenüber befinden; infolge der durch den Ladungsausgleich hervorgerufenen Strömungen

[1]) J. Zenneck, Elmgt. Schwgn., p. 736.

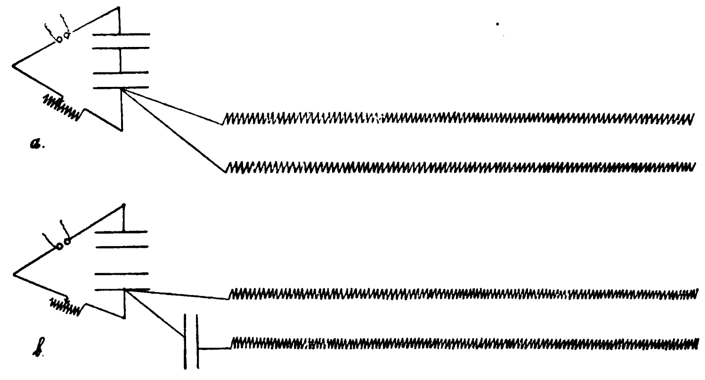
sollte dann eine magnetische Kraft senkrecht zur Ebene der Spulen zwischen ihnen entstehen; die magnetischen Oscillationen sollten dann zunächst mit einem Sekundärkreis, der analog dem bei der Einzelspirale gebaut war, nachgewiesen werden, also bei der Stellung der Sekundärspule, bei der die Ebene der Sekundärspule in der Ebene der Spiralenachsen lag.

Um dem elektrischen Feld einen breiten Raum zu geben, wurden die Spiralen auf vierkantigen Buchenholzstangen aufgewickelt, die 2 m lang und 4 × 2 cm dick waren; der Draht war 0,3 mm dicker einmal umsponnener Kupferdraht. Beide Spiralen wurden gleichsinnig gewickelt, ein solches System hat dann, genau wie die Lechersche Anordnung, keine Strahlung nach den Versuchen von Nesper[1]).

Die Versuche mit den beiden Spiralen als Lechersches System führten jedoch zu keinem befriedigenden Resultat.

Einmal lag das wohl am Erreger; der Thomsonsche Schwingungskreis ist dazu ungünstig, da er ein geschlossener Schwingungskreis ist und als solcher mit seinen einzelnen Teilen, bestehend aus Kapazität, Funkenstrecke und Selbstinduktion, eine unsymmetrische Anordnung besitzt. Es können daher an ihm nicht zwei Punkte definiert werden, die in einem gewissen Zeitmoment entgegengesetzte Ladung haben. Wurden die Spulen an die beiden Leydener Flaschen des Schwingungskreises angeschlossen, so war das eine solche Belastung des Induktoriums, daß die Funkenschlagweite des Thomsonkreises gemindert werden mußte, die Spulen wirkten dabei als Zusatzkapazitäten zu den Leydener Flaschen. Als Speisungspunkt für beide Spiralen wurde dann der Punkt genommen, der bei den Versuchen mit einer Spirale gewählt worden war, nämlich der innere Belag der einen Leydener Flasche (Figur 11a); jedoch waren hier nicht die Bedin-

[1]) Nesper, a. a. O. p. 12.



Figur 11.

gungen des Lecherschen Systems erfüllt, da sich dabei immer gleichsinnige Knoten und Bäuche gegenüberlagen.

Die richtigen Bedingungen sollten hierauf durch Verschieben der einen Spirale um $\lambda/2$ längs ihrer Achse erreicht werden; das zeigte sich jedoch als nicht angängig, da sich die Wellenlänge der einen Spirale sofort änderte infolge magnetischer gegenseitiger Beeinflussung. Diese magnetische Koppelung war überhaupt ein großer Nachteil[1]), der sich auch bei größerem parallelen Abstand der Spiralen nicht vermeiden ließ. Durch aufgelegte Messingstäbe als Brücken konnten diese Störungen halbwegs beseitigt werden, doch wurde dann die Grundschwingung wieder stark geschwächt.

Ferner wurde versucht, durch ein eingeschaltetes Zwischenstück die richtigen Verhältnisse zu erreichen. Dieses Zwischenstück wurde in denselben Dimensionen gewickelt, seine Länge betrug jedoch nur $\lambda/2$ der gewählten Spiralenschwingung. Angeschlossen wurde es an demselben Punkt des Thomsonkreises wie die eine Spirale, das andere Ende des Zwischenstücks war mit der zweiten Spirale verbunden. Die beiden Spiralen lagen sich dann dabei parallel gegenüber. Doch auch so konnten die Bedingungen für ein Lechersches System nicht er-

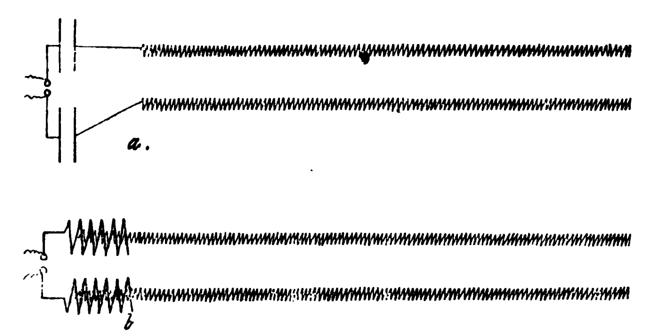
---

[1]) Vergl. hierzu die Resonanzversuche, die im Anhang beschrieben sind.

reicht werden, das Zwischenstück schwang für sich allein, die mit ihm verbundene Spirale koppelte sich magnetisch mit der direkt angeschlossenen Spirale.

Sodann wurde versucht, die eine Spirale indirekt anzuschließen, indem die eine Leydener Flasche des Thomsonschen Schwingungskreises mit einer Kondensatorplatte aus Zinkblech verbunden wurde, die Spirale wurde mit der anderen Kondensatorplatte verbunden (Figur 11b) und zwischen beide Platten zur Verhütung des Funkenübergangs eine Paraffinplatte gestellt. Die auf diese Weise erregte Spirale schwang aber zu schwach im Vergleich mit der direkt gekoppelten Spirale und wurde von dieser daher stark beeinflußt.

Es wurde nunmehr zu dem Bau eines offenen Oscillators in symmetrischer Anordnung geschritten. Eine Funkenstrecke wurde von dem Induktorium gespeist; zu beiden Seiten dieser Funkenstrecke waren zwei Kondensatorplatten angebracht[1]), beiden standen zwei andere



Figur 12.

Platten gegenüber, die mit den Spiralen verbunden waren (Figur 12a), im wesentlichen also eine Anordnung,

[1]) Eine andere Variation war die, daß zu beiden Seiten der Funkenstrecke eine Selbstinduktion angebracht wurde, die aus Windungen blanken Kupferdrahtes auf Glaszylindern bestand; die Spiralen wurden dann durch induktive Kupplung, wie sie Figur 12b veranschaulicht, zum Schwingen gebracht. Die Verhältnisse wurden jedoch nicht reiner.

wie sie Hertz bezw. Lecher angegeben hat. Ziemlich reine Wellen wurden dann dadurch erreicht, daß das Ende der beiden Spiralen durch ein Zinkblech verbunden wurde; dieses wurde zur Erde abgeleitet und war 20 × 4 cm breit, so daß hier eine kräftige Reflexion stattfinden konnte.

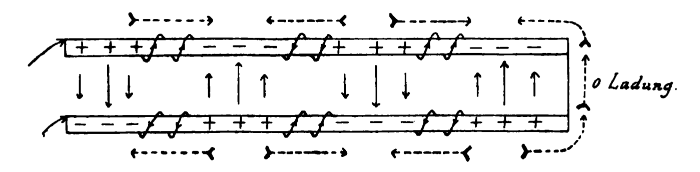
Tatsächlich konnte dann an dieser Schleife die magnetische Kraft, wie sie am Ende des Lecherschen Systems auftritt, nachgewiesen werden mit einem dem obigen analogen Sekundärkreis. In dem übrigen Felde ließ sich dagegen der zu erwartende Verlauf der magnetischen Kraft nicht nachweisen, vielmehr sprach der Sekundärkreis sehr regellos an.

2. Diskussion der erhaltenen Resultate.

Daß die elektrischen Kraftlinien, analog wie beim Lecherschen System, von Punkten der einen Spirale zu gegenüberliegenden Punkten der andern Spirale verlaufen, ist wohl sicher anzunehmen.

Die Erklärung, wie sie oben für die magnetischen Kraftlinien bei einem geradlinig ausgespannten System gegeben wurde, ist allein jedoch hier nicht ausreichend. Es gibt in dem Falle der Spiralen zwei Arten koexistierender magnetischer Kraftlinien, die man einzeln betrachten kann und die sich zu dem tatsächlichen Felde zusammensetzen.

Bei den geradlinigen Drähten waren die magnetischen Oscillationen die Folgeerscheinungen der Strömungen, die durch den Ausgleich der Ladungen hervorgerufen wurden und die dort parallel zu den Drahtachsen erfolgten, wie das in Figur 13 die gestrichelten ge-



Figur 13.

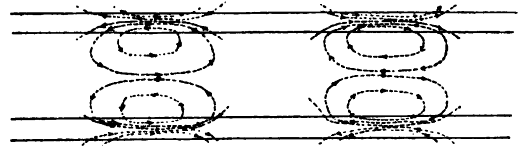
fiederten Pfeile andeuten sollen. Bei dem spiralig aufgewundenen Draht ist jedoch die Strömung eine solche längs den Windungen, vergl. Figur 13, wo sie die Pfeilspitzen an den angedeuteten Windungen für einen gewissen Zeitmoment darstellen sollen. Diese Strömung i kann nun in zwei Komponenten zerlegt werden, i_1 und i_2, von denen die eine, i_1, in Richtung der Spulenachse verläuft, die andere, i_2, senkrecht dazu (Figur 14). Zu jeder dieser beiden elektrischen Stromkomponenten gehört auch eine magnetische Kraftrichtung. Aus der Strömung i_1 im Verein mit der auf der andern Spirale gegenüber stattfindenden Strömung, die in demselben Zeitmoment in entgegengesetzter Richtung erfolgt, würde eine magnetische Kraft resultieren, die analog wie beim geradlinigen Drahtpaar senkrecht zu der Ebene der beiden Spiralenachsen schwingen würde. Doch diese Komponente der Strömung ist gering; wegen der sehr kleinen Ganghöhe der Windungen ist sie mit großer Annäherung Null, was auch Sommerfeld[1]) annimmt und seinen Berechnungen des Wechselfeldes bei Spulen zu Grunde legt. Die Strömung i_2 erfolgt danach nahezu kreisförmig um die Spiralenachse herum, die aus ihr resultierende magnetische Kraft schwingt in Richtung der Spiralenachse und hat den im vorigen Kapitel experimentell nachgewiesenen Verlauf. Diese Art magnetischer Kraftlinien haben also ihren Ursprung in der Strömung jeder Spirale und treten aus deren Innerem in den äußeren Raum aus; im Felde zwischen den beiden Spiralen heben sie sich im Idealfalle in ihrer Wirkung gegenseitig auf, so daß durch eine Sekundärspule, deren Achse parallel zu den Spiralenachsen in der Mitte des Feldes liegt, genau soviel Kraftlinien der einen Richtung wie der andern Richtung verlaufen; der Sekundärkreis wird also nicht

i_1 i i_2

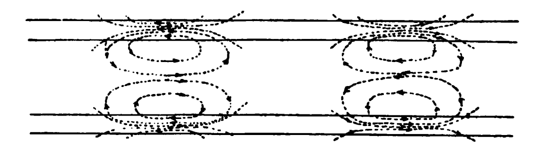
Figur 14.

---

[1]) A. Sommerfeld, Ann. d. Phys. 15, p. 673, 1904.



a. Ungleichnamige Knoten.



b Gleichnamige Knoten

Figur 15.

ansprechen[1]). In Figur 15a sollen die Pfeilspitzen den Verlauf der Kraftlinien für einen gewissen Zeitmoment ausdrücken. Tatsächlich wird aber dieser Idealfall völliger Gleichheit der von beiden Seibtschen Spiralen auslaufenden Kraftlinien wohl kaum erreicht, da die Dimensionen beider Spiralen nicht genau dieselben sind, sondern es entsteht infolge Überwiegens der Kraftlinien der einen oder der andern Spirale ein Differenzfeld.

Wie auf Seite 11 für geradlinige ausgespannte Drähte durchgeführt ist, so sind auch hier im Felde zwischen den beiden Spiralen die Änderungen der Äther-Polarisation zur Erklärung einer magnetischen Kraftkomponente, die senkrecht zur Ebene der Spulenachsen gerichtet ist, heranzuziehen. Hier wie dort stehen sich in einem gewissen Augenblick an entsprechenden Stellen der Spiralen entgegengesetzte elektrische Ladungen gegenüber, die also eine Polarisation des Äthers ergeben. Auch hier ent-

---

[1]) Der Wicklungssinn beider Spiralen ist derselbe; bei verschiedenem Wicklungssinn werden wegen des Verlaufes der Strömung die magnetischen Kraftlinien bei der vorliegenden Schaltung gleiche Richtung haben. [Fig. 15b; siehe auch Seite 44, wo in Bezug auf die magnetischen Kraftlinien derselbe Verlauf, aber aus anderen Gründen, resultiert.]

stehen also beim Nachlassen dieser elektrischen Spannungen Verschiebungsströme der Polarisation im Äther zwischen den beiden Spulen, die ebenso gerichtet sind wie beim geradlinigen Lecherschen System; diese geben dann wie dort eine magnetische Kraft senkrecht zur Ebene der Spiralachsen. Den vollständigen Schluß jener Verschiebungsströme bildet die Strömungskomponente i_1; letztere ist zwar sehr klein, aber immerhin vorhanden.

Wir haben also einerseits magnetische Kraftlinien, die ihren Ursprung im Inneren jeder Spirale haben, andererseits solche, die aus der Äther-Polarisation im Felde zwischen den beiden Spiralen entstehen.

Beide Komponenten zusammen bilden nun das resultierende magnetische Kraftfeld, sie werden sich zum wenigsten störend beeinflussen, so daß eine rein senkrechte Richtung der magnetischen Kraft nicht eintreten und nachgewiesen werden kann. Zum mindesten wird eine schief zur Ebene der Spiralenachsen gerichtete magnetische Kraftresultante auftreten, die in unserm Falle jedoch annähernd parallel zur Achsenrichtung der Spulen verlaufen wird.

Ist die Ganghöhe der Windungen eine endliche, bildet sie einen hinreichend großen Winkel mit der Achsenrichtung, so werden beide Komponenten der Strömung, i_1 und i_2, von gleicher Größenordnung sein. Mit wachsender Ganghöhe nähert sich das Feld immer mehr demjenigen des Lecherschen Systems. Untersuchungen mit verschiedener Ganghöhe liegen jedoch nicht vor.

Auf diese Weise erklären sich wohl die unklaren experimentellen Ergebnisse. Dagegen konnte am Ende der Spirale der erwartete Verlauf der magnetischen Kraftlinien senkrecht zur Ebene der Spulenachsen wohl eintreten, da hier das Zinkblech einmal eine kräftige Reflexion der Wellen hervorrief, dann aber auch, da die Brücke der Strömung den linearen Verlauf gab, den sie auch an dieser Stelle beim ausgespannten Lecherschen System hat und der sich mit dem elektrischen Verschiebungsstrom der

dielektrischen Polarisation zu einem Ampèreschen Kreisstrom in der Ebene der Spulenachsen zusammensetzt.

Bei der Schaltung, die Figur 11a wiedergibt, wo also an den Maximalstellen gleichnamige elektrische Ladungen sich gegenüberliegen, und wo die Strömung wegen des gleichen Wicklungssinnes in gegenüberliegenden Punkten gleich verläuft (was in der Figur 15b mit „gleichnamige Knoten" ausgedrückt sein soll), läßt sich der Verlauf der magnetischen Kraftlinien, wie er für jede Spirale sich ergibt, nachweisen bei derjenigen Stellung der Sekundärspule im Felde zwischen den beiden Spiralen, bei der ihre Achse parallel liegt zur Achse der Spiralen. In den Knoten der elektrischen Kraft spricht dann die Funkenstrecke des Sekundärkreises an, in den Bäuchen nicht; doch sind dann ja die Bedingungen des Lecherschen Systems nicht erfüllt und der Verlauf der elektrischen Kraftlinien ein komplizierter.

Die Schwingungen der Spiralen wurden übrigens immer dadurch nachgewiesen, daß an der Außenseite einer jeder Spirale ein dünner Stahldraht parallel zur Achse angebracht war, genau wie bei der Seibtschen Spirale allein. Auch können die Stellen der elektrischen Knoten und Bäuche im Felde zwischen den Spiralen durch das Ansprechen von Vakuumröhren exakt abgesucht werden.

IV. Kapitel.

Versuche mittels Ablenkung von Kathodenstrahlen.

1. Versuche mit der Braunschen Röhre.

In der Hoffnung, den von K. Kießling erbrachten Nachweis (Seite 17) der magnetischen Kraft und ihres Verlaufes am Ende des Lecherschen Systems mit der Braunschen Röhre auch auf das übrige Lechersche System, insbesondere auf die Knotenstellen der magnetischen Kraft ausdehnen zu können, wurden die Versuche mit der Braunschen Röhre wieder aufgenommen. Letztere wurde von einer 20-plattigen Töplermaschine gespeist und war zusammen mit einem Richtmagneten, der den Kathodenstrahl durch 2 Diaphragmen zum Fluoreszensschirm lenkte, auf einem Brett montiert, so daß diese Anordnung bequem unter der horizontalen Drahtebene des Lecherschen Systems verschoben werden konnte. Die Richtung des Kathodenstrahls war in der Ebene der Drähte senkrecht zur Drahtrichtung, so daß sich, genau wie bei K. Kießling, durch das Magnetfeld des Lecherschen Systems eine horizontale Ablenkung ergeben mußte. Das Lechersche System wurde erregt mittels des beschriebenen Blondlot-Coolidge-Erregers. Kurz hinter der Anschlußstelle der Drähte an den Erreger befand sich die erste Brücke, die für gute Ausbildung der stehenden Welle die maßgebende ist, die zweite Brücke befand sich erst am dritten Knoten der elektrischen Welle, die eine Länge von 110 cm hatte; unter dem dazwischen liegenden Knoten, einer Maximalstelle der magnetischen Kraft, war die Braunsche Röhre aufgestellt.

Die Versuche verliefen fast ganz negativ, es war keine Ablenkung oder Verbreiterung des Kathodenstrahls zu bemerken. Hieran war vielleicht einerseits schuld, daß das magnetische Feld des Lecherschen Systems zu schwach war; auch störten hier elektrostatische Einflüsse, die sich auf keinerlei Weise, auch nicht durch Erden der aufgelegten Brücken, beseitigen ließen. Andererseits kann das Versagen an der großen Geschwindigkeit der negativen Teilchen und der damit verbundenen Steifigkeit des Strahles gelegen haben.

Die Wechselzahl der Schwingungen des Lecherschen Systems betrug $3 \cdot 10^8$ in der Sekunde. Zenneck[1]) konnte u. a. die Braunsche Röhre benutzen bei Schwingungen bis zu 10^4 Wechseln in der Sekunde; bei Schwingungen, die diesen Wert überstiegen, wurde die Ablenkung so klein, daß sie auf dem Schirm kaum mehr sichtbar war.

2. Versuche mit der Wehneltröhre.

Die Versuche mit der Braunschen Röhre wurden verlassen, da neuerdings von Wehnelt[2]) ein Weg angegeben wurde, Kathodenstrahlen zu erzeugen, die eine bedeutend geringere Geschwindigkeit besitzen und die daher durch ein Magnetfeld eine größere Ablenkung erfahren.

Die hier angewandte Wehneltröhre war folgendermaßen eingerichtet: Ein CaO-Fleck wurde von 3 hintereinander geschalteten Akkumulatoren mit Regulierwiderstand erhitzt; von ihm ging der Kathodenstrahl in Form eines bläulichen Lichtkegels zu einem Diaphragma, das gleichzeitig als Anode diente; der hindurchtretende dünne Strahl konnte mittels eines zweiten Diaphragmas auf die Mitte eines Fluoreszensschirmes gelenkt werden. Die Röhre hatte zwischen beiden Diaphragmen einen Durchmesser

---

[1]) J. Zenneck, Elmgt. Schwgn., p. 351. Auch P. Drude sagt gelegentlich (Ann. d. Phys. 9, p. 611, 1902): „... die Braunsche Röhre, die für schnelle Schwingungen noch nicht mit Erfolg benützt ist, ...".

[2]) A. Wehnelt, Ann. d. Phys. 14, p. 425—468, 1904.

von 2,5 cm, so daß der Strahl in nächste Nähe des magnetischen Wechselfeldes gebracht werden konnte. Gespeist wurde die Röhre von einer Influenzmaschine mit doppelter Drehung[1]), wie sie zuerst von W. Holtz angegeben wurde, einer jetzt meist „Wimshurstschen" genannten Maschine, deren Pole entsprechend mit Kathode (Ca O-Fleck) und Anode, bei letzterer unter Zwischenschaltung eines Flüssigkeitswiderstandes, verbunden waren. Um die Spannung herabzusetzen, war an dem einen Polknopf der Influenzmaschine eine feine Nadelspitze befestigt; durch Regulierung des Abstandes dieser Spitze von dem andern Polknopf konnte die Spannung beliebig vermindert werden. Es war dies nötig, da allzu hohe Spannungen elektrostatische Ladungen des Glases und sogar des darüberliegenden Drahtsystems hervorriefen; hierdurch trat lebhaftes Zucken des Strahls ein.

Doch auch nach Vermeidung aller dieser störenden Begleiterscheinungen waren reine Resultate nicht zu erzielen. Als Lechersches System wurde das beschriebene mittels Blondlot-Coolidge-Erreger verwandt. Es stellte sich im Bauch der magnetischen Kraft eine Ablenkung unter einem Winkel von 45^0 ein, während im Bauch der elektrischen Kraft eine vertikale Schwingungsrichtung eintrat. Die Länge dieses Streifens, zu dem so der diagonal auf dem Fluoreszensschirm schwingende Kathodenstrahlfleck ausgezogen wurde, betrug etwa 3 mm.

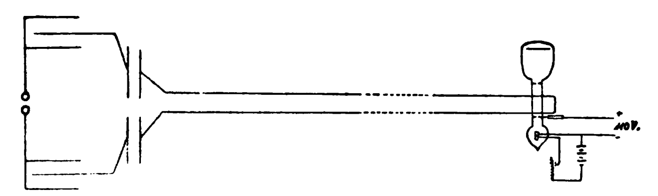
Hiermit war die magnetische Kraft am Lecherschen System, wenn auch in unreiner Weise durch elektrostatische Einflüsse gestört, nachgewiesen.

Um nun alle Mißstände völlig zu beseitigen, wurden die Versuche wiederholt mit bedeutend geringerer Spannung, so daß sehr langsame, stark ablenkbare Kathodenstrahlen entstanden, durch welchen Vorteil sich die Wehneltröhren ganz besonders auszeichnen, sowie mit einem intensiveren Wellensystem.

---

[1]) Vergl. hierzu: W. Holtz, Ztschr. f. phys. u. chem. Unt. XVII, p. 193 ff., 1904.

Schon Wiechert[1]) hatte anläßlich von Geschwindigkeitsmessungen der Kathodenstrahlen unter Anwendung der Lecherschen Drahtschleife, deren magnetische Komponente er benutzte, die Forderung ausgesprochen, daß das Wellensystem sehr intensiv sein müsse, und hatte danach eine große Kapazität des Erregers verlangt. Mittels seiner getroffenen Anordnungen hatte er auch eine Ablenkung des Kathodenstrahls erhalten. Als Erreger wurde hiernach der offene Hertzsche Erreger gewählt. Ein Induktorium speiste eine Funkenstrecke, die beiderseits unter Zwischenschaltung von Leydener Flaschen mit Kondensatorplatten von 20 cm Durchmesser verbunden war. Die hiermit erzielte Wellenlänge betrug ungefähr 6 m. Wegen der damit verbundenen unbequemen Länge des Drahtpaares wurde nur das erste Viertel der Welle benutzt, so daß sich die Drahtlänge auf 1,30 m reduzierte; am Anfang des Drahtpaares, an der Anschlußstelle an die Kondensatorplatten, war eine Maximalstelle der elektrischen Kraft, sichtbar an dem intensiven Leuchten der sehr dünnen Drähte, wie sie auf Seite 22 beschrieben sind; am Ende, das leitend überbrückt war, war ein Knoten der elektrischen Kraft, also eine Maximalstelle der magnetischen Kraftkomponente. Unter dieser Endschleife (Figur 16) befand sich die



Figur 16.

Wehneltröhre, die diesmal mit 110 Volt aus der Institutsbatterie gespeist wurde; um den Kathodenstrahl, der bei geringerer Spannung auch eine geringere Geschwindigkeit besitzt, zu erhalten, mußte jetzt aber der CaO-fleck bis fast zu heller Weißglut erhitzt werden, von dem aus dann

[1]) E. Wiechert, Wied. Ann. 69, p. 747, 1899.

ein intensiver blauer Lichtkegel ausging; der Strahl hinter dem Anodendiaphragma war jedoch bei dieser niedrigen Spannung nicht bis zum Fluoreszensschirm zu verfolgen, er verlor sich unterwegs. Das Magnetfeld wurde in seiner Wirkung auf diesen Lichtkegel untersucht; es zeigte sich eine, wenn auch sehr minimale Verbreiterung des Kegels in horizontaler Richtung, die aber nur bei angespanntester Aufmerksamkeit bemerkbar war; im Bauch der elektrischen Kraft blieb sie aus.

Mithin dürfte, wenn auch in sehr bescheidenem, zur Demonstration nicht geeignetem Maße die magnetische Kraft am Lecherschen System auch vermittels der Braunschen Röhre, also in direktester Weise, nachgewiesen sein.

3. Nebenerscheinungen bei der Wehneltröhre.

Im Anschluß hieran mögen einige Erscheinungen angeführt sein, für die eine genügende Erklärung nicht gegeben werden kann, und die vielleicht mit daran Schuld tragen, daß die eigentlichen Resultate teils unklar teils so minimal hervortraten.

Auch bei weniger als 110 Volt Spannung traten die Kathodenstrahlen auf, doch mußte dann der Platinstreifen mit dem CaO-fleck bis zur Weißglut erhitzt werden. Noch bei 90 Volt Spannung traten sie beim Erhitzen von selbst auf, bei niedrigeren Spannungen, wobei bis auf 76 Volt heruntergegangen wurde, erhielt man selbst bei dem stärksten Glühen, das noch ohne Gefahr des Durchschmelzens möglich war, nicht mehr von selbst den blauen Lichtkegel der Kathodenstrahlen. Wurde jedoch das über der Röhre liegende Lechersche System für einen kurzen Augenblick in Tätigkeit gesetzt, so trat momentan das Lichtbündel der Kathodenstrahlen auf und blieb dann auch nach dem Aufhören der elektrischen Wellen bestehen. Zur Erklärung dieser Erscheinung muß wohl die Jonisation durch das Wechselfeld angeführt werden, die den vom

CaO-fleck ausgehenden negativen Jonen den Weg vorbereitet.

Es zeigte sich dabei noch folgendes: Je höher die Temperatur des CaO-fleckes war, um so kleiner war die Spannung, bei der die Aussendung der Kathodenstrahlen durch ein kurze Zeit wirkendes Wechselfeld des Lecherschen Systems eingeleitet werden konnte. Quantitative Messungen dieser Erscheinungen sind noch nicht angestellt worden. Wurde bei den geringen Spannungen bis zu 110 Volt hinauf die Temperatur der Kathode bis zur schwachen Rotglut herabgesetzt, so wurde naturgemäß auch das Kathodenstrahlbündel schwächer und der Strahl war schließlich nur noch ein ganz feiner Pinsel, dessen Querschnitt in einigen cm Entfernung vom Fleck nur ungefähr noch 1 mm^2 betrug; dieser fing durch das Einschalten des Lecherschen Systems an zu intermittieren und, wie beobachtet wurde, scheinbar im Rhythmus des Hammerunterbrechers am Induktorium.

Bei ganz schwachem Glühen, wenn der Kathodenstrahl nur noch ein ganz feiner Streifen war, wurde dieser sogar bei Erregung des Lecherschen Systems zum Erlöschen gebracht. Dies trat übrigens auch bei intensiveren Strahlen durch Ablenkung mit starken Magneten ein, falls die Krümmung des Kathodenstrahls zu groß wurde; nach Entfernen des Magneten trat dann niemals mehr der Kathodenstrahl von selbst wieder auf, konnte aber dann durch kurzes Einwirken der Wellen des Lecherschen Systems wieder hervorgebracht werden.

Zum Schlusse sei noch folgendes angeführt: Lenkt man mittels eines Magneten den Kathodenstrahl soweit ab, daß er nicht mehr die Anodenplatte trifft, sondern bis zur Röhrenwand abgelenkt wird, so zeigt sich über der Anodenplatte eine schwach bläuliche halbkugelförmige Lichthaube. Auf eine Deutung dieser Erscheinung muß vorläufig verzichtet werden, da sie zunächst noch nicht weiter untersucht wurde.

Erwähnt sei schließlich noch, daß bei starkem Glühen der Kathode von dem CaO-fleck aus durch den Platinstreifen hindurch nach rückwärts ein schmales blaues Lichtbündel austrat, das äußerlich dasselbe Bild bot wie der nach vorne austretende Kathodenstrahl, und das seine Kathodenstrahlnatur durch magnetische Ablenkbarkeit in richtigem Sinne bewies. Seine Geschwindigkeit wurde nicht gemessen; da jedoch zu vermuten stand, daß dieser Strahl eine langsamere Geschwindigkeit besitze, wurde auch er der Einwirkung der magnetischen Komponente des Lecherschen Systems ausgesetzt, ohne daß jedoch eine sichtbare Ablenkung erzielt wurde.

Nachtrag bei der Korrektur.

Die im vorstehenden beschriebenen Nebenerscheinungen sind inzwischen durch Herrn K. Goes unter Leitung von Herrn Professor Dr. F. A. Schulze und Herrn Dr. Karl Stuchtey weiter untersucht und zum Teil bereits aufgeklärt worden; siehe Gesellsch. z. Bef. d. ges. Naturwiss. zu Marburg, Sitzung vom 12. Dezember 1906, pag. 178—184.

V. Kapitel.

Negative Versuche.

1. Mit der Wismutspirale.

Es wurde der Versuch gemacht, die magnetische Kraft des Lecherschen Systems mit der Lenardschen Wismutspirale nachzuweisen. Alle Versuche Lenards und auch solche, die später von anderen ausgeführt wurden, beziehen sich nur auf konstante Magnetfelder. Untersuchungen mit langsam wechselnden Feldern hat W. Eichhorn[1]) ausgeführt. Über das Verhalten von Wismut in sehr schnellen Wechselfeldern liegen Untersuchungen jedoch nicht vor. Bei den angestellten Versuchen gelang es in keiner Weise in den magnetischen Wechselfeldern des Lecherschen Systems oder der Seibtschen Spirale Widerstandsänderungen der Wismutspirale zu beobachten. Es muß daher dahingestellt bleiben, ob die schnellen magnetischen Oscillationen der hier beschriebenen Anordnungen überhaupt noch eine Widerstandsänderung hervorrufen können, und auch ob die Empfindlichkeit der getroffenen Anordnungen für eine sichere Beobachtung günstig war.

2. Magnetisierung von Eisenpulver.

Die magnetische Komponente ließe sich vielleicht auch noch auf anderen Wegen zur Darstellung bringen, und zwar kommt da ein Weg in Betracht, der bei langsamen Schwingungen oder bei so langwelligen, die praktisch einem Gleichstrom nahekommen, sich eigentlich von selbst ergibt; es ist dies die Magnetisierung von Eisenmassen. Diese folgt den langsamen Schwingungen in den Polwechseln vollkommen; für höhere Frequenzen hat

[1]) W. Eichhorn, Ann. d. Phys. 3, p. 20, 1900.

Drude[1]) theoretisch gefolgert, daß die Magnetisierung von Eisen und Nickel tatsächlich den Hertzschen Schwingungen zu folgen vermag, aber nur oberflächlich. In experimenteller Hinsicht haben dann Braun[2]) und Zenneck[3]) bessere Resultate erhalten mit fein verteiltem Eisen; besonders ersterer konnte zeigen, daß fein verteiltes Eisenpulver die magnetische Kraft der Schwingungen in mehr oder weniger scharfe Bahnen zwingt.

Wie eingangs (Seite 18) erwähnt, hatte schon vorher im Greifswalder Institut Herr K. Kießling auf Veranlassung von Herrn Professor Richarz die Magnetisierung von Eisenpulver anzuwenden versucht auf den experimentellen Nachweis der Wellen magnetischer Kraft auf Drähten. Fortgesetzt wurden die Untersuchungen im hiesigen Institut von Herrn A. Stützer[4]); seine Versuche zeitigten jedoch nur bedingte Resultate.

Herr Stützer stellte aus einem Gemisch von Eisenpulver — ferrum limat. pulv. subt. — und Paraffin die Form eines Hufeisens her, das Paraffin hat dabei den Zweck, das Eisenpulver in die gewünschte Form zu bringen; die magnetische Wirkung im Wechselfeld ist dann zwar nicht genau dieselbe wie im stationären Feld, aber jedenfalls nicht viel verschieden. Zwischen die beiden Enden des Hufeisenkerns wurde ein Stäbchen, ebenfalls aus Eisenpulver und Paraffin hergestellt, drehbar um eine zu seiner Längsachse senkrechten Achse aufgehängt. Um den Kern war Kupferdraht spulenförmig aufgewunden. Wurde nun in diese Windungen der Wechselstrom eines Induktoriums hineingeschickt, so wurde das Eisen tatsächlich magnetisiert und das Stäbchen stellte sich in die Richtung der Kraftlinien. Auch die Schwingungen der Sekundärspule eines Teslatransformators riefen noch eine

---

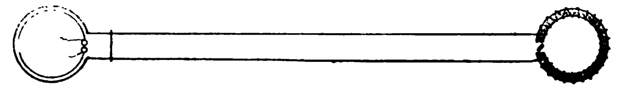
[1]) P. Drude, Physik des Äthers, 1894, p. 479.

[2]) F. Braun, Ann. d. Phys. 10, p. 326, 1903.

[3]) J. Zenneck, Ann. d. Phys. 12, p. 869, 1903.

[4]) Erwähnt in den Sitzungsberichten der Gesellsch. z. Beförd. d. ges. Natw. Marburg 1903, p. 96.

Magnetisierung hervor. Jedoch war eine Einstellung der Nadel beim Anschluß des Kerns an ein Lechersches



Figur 17.

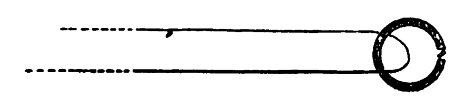
System, das durch einen Blondlot-Coolidge-Erreger in Schwingungen gebracht wurde, nicht mehr zu beobachten.

Das mag nun einerseits daran gelegen haben, daß an der Verbindungsstelle von Lecherschem System zu den Spulenwindungen (Figur 17) unter allen Umständen zum mindesten eine teilweise Reflexion der Welle eintritt, derart, daß an der Anschlußstelle von Lecherschen Drähten zur Kernwicklung ein Stromknoten, mithin ein Spannungsbauch der elektrischen Welle sich ausbildet. Diese Reflexion tritt immer ein, wenn in beiden Teilen der Gesamtleitung Selbstinduktionskoeffizient zu Kapazität sich verschieden verhalten. Dies ist hier der Fall. Mag nun auch die Spule, vorausgesetzt, daß es ihre Dimensionierung zuließ, für sich in Schwingung gewesen sein, jedenfalls trat hier am Ende wegen der vorherigen teilweisen Reflexion eine Schwächung des Schwingungssystems ein.

Andererseits kann das Versagen der Stützerschen Anordnung aber auch an der Schwingungsfrequenz gelegen haben. Sowohl Braun als auch Zenneck haben mit Frequenzen bis zu 10^6 in der Sekunde gearbeitet, der Blondlotsche Erreger liefert aber Schwingungen von $3 \cdot 10^8$ Wechseln in der Sekunde. Schon bei geringeren Wechseln haben die Genannten eine Abnahme der Permeabilität (infolge der Foucaultschen Wirbelströme) konstatiert, die Abnahme wächst voraussichtlich auch mit wachsender Schwingungszahl, und es steht daher zu vermuten, daß bei den hohen Wechseln des Blondlotschen Erregers das Eisenpulver in seiner Magnetisierung nicht mehr so vollkommen zu folgen vermag, daß eine sichtbare Wirkung erzielt wird. Da diese Magnetisierung für Wechsel über

$10^6/_{sec}$ scheinbar noch nicht untersucht ist[1]), so muß es dahin gestellt bleiben, ob die Mißerfolge von Herrn A. Stützer nicht in der zu hohen Abnahme der Permeabilität zu suchen sind. Dagegen erhielt er wohl Resultate bei geringerer Frequenz, da das Feld der Sekundärspule des Induktoriums eine Frequenz von 10^4 Schwingungen in der Sekunde hat, also der quasistationäre Charakter noch vorwiegt.

Auch seine Versuche, den Hufeisenkern an der Endschleife des Lecherschen Systems senkrecht zu diesem in



Figur 18.

den Verlauf der magnetischen Kraftlinien (vergl. Figur 1) zu legen und so eine Konzentration der Kraftlinien herbeizuführen, hatten keine positiven Resultate aufzuweisen. Die Nadel zwischen den beiden Polen des Kerns stellte sich nicht ein in den Verlauf der Kraftlinien. Besäße jedoch der Hufeisenkern eine Wicklung mit angeschalteter Funkenstrecke oder mit angelegter Geißlerröhre, so müßte sich bei geeigneter Abstimmung der Spule eine durch die magnetische Kraft hervorgerufene Sekundärschwingung nachweisen lassen, und zwar müßte dann diese Sekundärschwingung kräftiger sein als ohne den Eisenkern. Damit ließe sich die annähernd kreisförmig sich schließende Bahn der magnetischen Kraftlinien zeigen, doch ist die oben gegebene Darstellung mittels des Sekundärkreises bequemer und anschaulicher. Die Versuche des Herrn A. Stützer wurden in der angeführten Richtung nicht fortgesetzt.

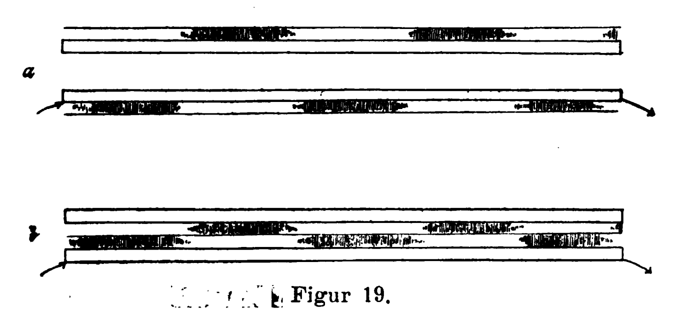
---

[1]) V. Bjerknes (Wied. Ann. 47, p. 69, 1892) spricht davon, daß Eisen noch durch Schwingungen von $10^3/_{sec}$ magnetisiert werde, doch sind in den angeführten neueren Arbeiten sichere Resultate nur für geringere Frequenzen erhalten und diskutiert worden.

Anhang.

Beschreibung eines Falles von Resonanz bei Spulen.

Auf die Wirkung der magnetischen Kraft allein wurde anfangs auch eine Erscheinung zurückgeführt, die bei folgender Versuchsanordnung eintrat. Von den beiden langen vierkantigen Spiralen wurde die eine in der oben (Seite 31) beschriebenen Weise mit dem Thomsonschen Schwingungskreise direkt verbunden und an ihrem andern Ende geerdet. Im Unterschiede zu der versuchten Anordnung des Lecherschen Systems (vergl. Seite 38) wurde die zweite Spirale in einem gewissen Abstande parallel zu ersterer gelegt und zwar mit freien, nicht geerdeten oder angeschlossenen Enden. Wurde nun auf der angeschlossenen Spirale eine gewisse Schwingung erzeugt, deren Wellenlänge in der bei der Seibtschen Spirale üblichen Weise an einem Leuchtbande erkannt werden



Figur 19.

konnte, so schwang die freie Spirale mit, und zwar zeigte sie die Stellen maximaler elektrischer Kraft an den

Stellen, an denen gegenüberliegend die primäre Spirale ein Minimum der elektrischen Kraft hatte; während die primäre Spule an ihrem geerdeten Ende einen Knoten der elektrischen Kraft zeigte, hatte die sekundäre Spirale an dem korrespondierenden (freien) Ende einen Bauch der elektrischen Kraft; die leuchtenden Stellen wechselten also gegenseitig ab, (s. Figur 19a)[1]).

Zur Erklärung dieser Erscheinung ist jedoch die magnetische Kraft nicht allein das Ausschlaggebende; man hat hier den allgemeinen Fall der Resonanz zweier (Spulen-) Antennen vor sich. Wenn die Enden der losen Spirale ebenfalls geerdet wurden, leuchtete sie an denselben Stellen wie die primäre Spule; an den Enden bildeten sich Knoten aus. Das Eintreten der Erscheinung ließ sich durch Erden oder Nicht-Erden der einen oder anderen Spirale beliebig ändern, auch bei Änderung der Wellenlänge des Thomsonschen Schwingungskreises. In jedem einzelnen Falle war aber infolge des symmetrischen Aufbaus der Spiralen sowohl in der primären wie in der sekundären Spirale Schwingungen derselben Wechselzahl vorhanden. Wurde die Eigenschwingung der sekundären Spirale jedoch willkürlich geändert, z. B. durch Anlegen einer Metallplatte, dann war die Resonanz gestört, und die Spirale zeigte ein unregelmäßiges Leuchtband.

Bei gewissem Abstand der Spiralen (etwa 15—20 cm), also bei relativ loser Koppelung war die Primärspule diejenige, die das stärker ausgeprägte Leuchtband hatte. Dieses Verhältnis änderte sich aber, sobald die Koppelung fester wird, also bei geringer werdendem Abstand der Spiralen; es zeigte sich dann ein viel schwächeres Leuchten der Primärspirale, während nun die sekundäre

---

[1]) Die Stahldrähte waren an der Außenseite der Spiralen entlang gespannt im Abstand von 5 cm. Prägnanter wurde der Versuch, wenn die beiden Spiralen auf 10 cm genähert wurden und nur ein Stahldraht für beide Spiralen gemeinsam zwischen ihnen ausgespannt wurde; man sah dann, wie das Figur 19b andeuten soll, die abwechselnd leuchtenden Stellen links und rechts vom Draht.

Spirale ein kräftiges leuchtendes Band gab. Die Resonanz beider Spiralen war bei einem Abstand von etwa 16 cm am schärfsten. Die Erscheinungen sind entsprechende[1]), wie sie Zenneck für den Fall zweier gekoppelter Oscillatoren beschrieben und erläutert hat.

Auch mit ausgespannten Lecherschen Drähten wurden die Versuche wiederholt, indem genau über dem in einer horizontalen Ebene liegenden Drahtpaar, das an den Blondlotschen Erreger angeschlossen war, ein ebensolches Drahtpaar von derselben Länge in einer Entfernung von 3 cm angebracht wurde. Waren dessen Enden weder geerdet noch angeschlossen, so leuchtete das sekundäre Drahtpaar an den Stellen, an denen das darunter liegende primäre Drahtsystem dunkel war, und umgekehrt.

---

[1]) J. Zenneck, Elmgt. Schwgn. p. 657ff.

Es sei mir gestattet an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer

Herrn Professor Dr. F. Richarz

für die Anregung und die mir in reichem Maße zuteil gewordene Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

Ebenso möchte ich hiermit Herrn Professor Dr. F. A. Schulze für seine mir oftmals gütigst erteilten Ratschläge herzlichst danken.

Lebenslauf.

Am 8. Januar 1883 wurde ich, Karl Wilhelm Bangert, evangelischen Bekenntnisses, preußischer Staatsangehörigkeit, als Sohn des Lehrers am Realgymnasium Wilhelm Bangert zu Frankfurt a. M. geboren. Den ersten Unterricht genoß ich in der Vorschule des Wöhler-Realgymnasiums und besuchte von Ostern 1892 ab das Goethe-(Reform-)Gymnasium, das ich Ostern 1901 mit dem Zeugnis der Reife verließ, um mich dem Studium der Mathematik und Naturwissenschaften zu widmen.

Meine Studien begann ich an der Universität in München, die ich nach zwei Semestern, Ostern 1902, mit der Universität in Berlin vertauschte; nach einem dreisemestrigen Aufenthalt daselbst setzte ich im Herbst 1903 meine Studien in Marburg fort. In Berlin und in Marburg absolvierte ich meine physikalischen Praktika, im Marburger Mineralogischen Institut nahm ich an den mineralogischen Übungen teil; meine chemischen Praktika erledigte ich in dem unter der Leitung des Herrn Professors Dr. M. Freund stehenden chemischen Laboratorium des Physikalischen Vereins in Frankfurt a. M.

Im Sommer 1904 stellte mir Herr Professor Dr. F. Richarz das Thema der vorliegenden Arbeit. Das Examen rigorosum bestand ich am 7. November 1906; danach trat ich sofort die Stelle eines wissenschaftlichen Hilfsarbeiters im Kaiserlichen Telegraphen-Versuchsamt in Berlin an.

Meine akademischen Lehrer waren

in München: von Baeyer, Bauer, Doehlemann, Göttler, Lindemann, Lipps, Pringsheim, Röntgen, von Weber;

in Berlin: Blasius, Friedländer, Frobenius, Knoblauch, Münch, Paulsen, Pringsheim, H. A. Schwarz, von Wilamowitz-Möllendorff;

in Marburg: Bauer, von Dalwigk, Feußner, Hensel, Heß †, Kayser, Richarz, Schaum, F. A. Schulze, Schwantke, Zincke.

Allen meinen hochverehrten Lehrern spreche ich meinen ehrerbietigsten Dank aus.



